

黄土高原小流域退耕还林还草的生态水文效应与可持续性

金 钊^{1,2*}

1. 中国科学院地球环境研究所 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061
2. 陕西黄土高原地球关键带国家野外科学观测研究站, 西安 710061

摘要:黄土高原实施退耕还林还草工程 20 余年, 区域生态环境发生巨大变化, 过度植被恢复产生的负效应也逐步显现, 有关黄土高原高强度植被恢复的可持续性问题引起讨论。当前, 黄土高原植被恢复已进入一个节点性时期, 但植被重建的终极目标并不十分明确。未来 50—100 a, 黄土高原退耕还林还草工程的环境效应与可持续性如何, 目前缺乏前瞻性的科学认识。鉴于这一问题, 本文对黄土高原近 20 a 大规模植被恢复和重建产生的生态、水文、侵蚀和气候效应进行了回顾, 并对在甘肃庆阳南小沟沟长期退耕还林和还草小流域持续开展近 10 a 的观测研究成果进行了总结分析, 探讨长期自然和人为植被恢复背景下小流域的生态水文效应, 最后从小流域视角对黄土高原退耕还林还草的可持续性进行了探讨。针对当前黄土高原退耕还林还草工程取得的成绩和面临的挑战, 提出了退耕还林还草的两阶段论。第一阶段为退耕还林还草实施至今 20 a, 主要目标是增绿、控蚀、减泥沙, 目前这一目标已基本实现; 第二阶段为未来 20—30 a, 目标是稳绿、增水、促发展, 当前工作的重点是需要针对第二阶段的目标开展规划和研究工作, 提高黄土高原生态质量的持久性和区域人地关系的协调。

关键词: 植被恢复; 生态效应; 水文效应; 侵蚀效应; 气候效应; 可持续性

Ecohydrological effects and sustainability of the Grain for Green Project on the Chinese Loess Plateau

JIN Zhao^{1,2*}

1. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China
2. National Observation and Research Station of Earth Critical Zone on the Loess Plateau in Shaanxi, Xi'an 710061, China

Abstract: Background, aim, and scope The Grain for Green Project (GGP) has been initiated on the Loess Plateau for over 20 years, which has caused enormous changes in the regional eco-environment. Negative impacts of excessive vegetation restoration have emerged, such as soil water deficit and regional water resources shortage. The environmental effects of GGP in the next few decades have not been fully assessed. Therefore, the sustainability of large-scale vegetation restoration on the Loess Plateau is uncertain. This paper aims to articulate possible

收稿日期: 2022-03-29; 录用日期: 2022-04-14; 网络出版: 2022-04-19

Received Date: 2022-03-29; Accepted Date: 2022-04-14; Online first: 2022-04-19

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB40000000); 国家自然科学基金项目(41790444)

Foundation Item: Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (XDB40000000); National Natural Science Foundation of China (41790444)

通信作者: 金 钊, E-mail: jinzhao@ieecas.cn

Corresponding Author: JIN Zhao, E-mail: jinzhao@ieecas.cn

引用格式: 金 钊. 2022. 黄土高原小流域退耕还林还草的生态水文效应与可持续性 [J]. 地球环境学报, 13(2): 121–131.

Citation: Jin Z. 2022. Ecohydrological effects and sustainability of the Grain for Green Project on the Chinese Loess Plateau [J]. *Journal of Earth Environment*, 13(2): 121–131.

environmental trade-offs of GGP if it is continuously implemented in the next 50 to 100 years. The results of this paper can provide knowledge reference for scientific decision-making and proper implementation of high-intensive vegetation rehabilitation on the Loess Plateau. **Materials and methods** To tackle the questions as mentioned above, this paper reviewed the ecological, hydrological, pedological, and climatic effects of large-scale vegetation restoration on the Loess Plateau during the past 20 years. Then, we synthesized the results obtained from the paired catchments (tree-planting catchment vs. grass-revegetating catchment) in the Nanxiaohogou watershed of Qingyang City, Gansu Province. Environmental feedback as well as the positive and negative effects of long-term vegetation restoration were comprehensively evaluated. Finally, sustainability and consequence of converting farmland to forests in headwater catchments on the Loess Plateau were discussed. **Results** (1) Over the past 20 years, vegetation coverage on the Loess Plateau doubled, soil water deficit intensified, surface runoff and river discharge decreased, river sediment load reduced, and vegetation restoration showed positive feedback to regional rainfall increase. (2) After long-term returning farmland to forest, vegetation coverage of the tree-planting catchments was significantly higher than that of the catchments under grass revegetation. Two vegetation restoration measures resulted in varied ecohydrological processes of the paired catchments. Compared with the natural grassland catchment, the water yield capacity of the afforested catchment decreased by 90% after 70 years of plantation restoration, and the mechanisms of runoff generation also changed. The tree-planting catchment produced limited sediment output, and the water resource was highly consumed. At the scale of small watersheds, topographic factors and afforestation contributed equally to land surface energy balance. **Discussion** Sustainability of the conversion of farmland to forests on the Loess Plateau depends on the balance between maintaining reasonable runoff and sediment output, i.e., how to maintain the sediment transport of the Yellow River sustainably. The level of sediment transport of the Yellow River determines the intensity and duration of GGP. According to the preliminary results of the paired catchments, 70 years of afforestation resulted in almost no runoff and sediment output in the headwater catchment. From the point of view of system science, this situation has no problem to maintain the balance and stability of small catchments, but it is challenging to keep the material balance of large systems, such as the balance of water and sediment of the Yellow River. Existing research showed that the Yellow River Delta would face severe shrinkage and transgression due to the dramatic decrease in sediment transport of the Yellow River. Therefore, soil and water conservation on the Loess Plateau needs to be coordinated from small watershed management to whole watershed management to maintain the sustainability of environmental protection on the Loess Plateau and the overall health and high-quality development of the Yellow River Basin. **Conclusions** After 20 years of intensive vegetation restoration, ecology, hydrology, soil erosion, and climate of the Loess Plateau underwent dramatic changes, and the regional eco-environment change showed trade-off consequences. The most significant trade-off is trading water for green and sediment reduction. Our 10-year research through paired catchments observation indicated that the streamflow and sediment load will continuously decrease if maintaining the method of high-density tree plantation for 50 to 100 years in the future. Given the achievements and challenges of the GGP on the Loess Plateau, the problem should be viewed from the perspective of two stages. The first stage is 2000—2020, and the goals are increasing vegetation coverage, controlling soil erosion, and reducing sediment. The second stage is for the next few decades, and the goals are maintaining vegetation coverage, reducing vegetation density, increasing river water, controlling erosion in critical areas, and improving economic and social development. **Recommendations and perspectives** Currently, the goals of the first stage of GGP on the Loess Plateau have been achieved, and the focus of work now is to carry out planning and research for the goals of the second stage, promote the coordination of the human-environment relationship on the Loess Plateau, and serve the ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin.

Key words: vegetation restoration; ecological effect; hydrological effect; soil erosional effect; climatic effect; sustainability

黄土高原西起日月山，东至太行山，南靠秦岭，北抵阴山，是黄河泥沙的主要来源地，也是我国重要的能源重化工基地和北方地区的生态屏障。长期以来，黄土高原一直是国家生态保护和治理的重点区域，从“两屏三带”国家生态安全格局到“三区四带”全国重要生态系统保护和修复重大工程规划，黄土高原均位列其中（国家发展改革委和自然资源部，2020-06-03）。作为我国最具特色的地貌单元之一，黄土高原深受东亚季风影响，降雨变率大，且以暴雨形式为主，加之长期不合理的土地利用方式和易于侵蚀的黄土性质，使得黄土高原生态环境异常脆弱、自然灾害频发，是对气候变化和人类活动极为敏感的地区（安芷生等，1990；朱显谟，1998；郭正堂，2017；彭建兵等，2020）。中华人民共和国成立以来，为保障黄河的安澜，国家高度重视黄土高原的生态治理工作，实施了一系列生态和水土保持治理工程（国家发展改革委等，2010-12-30）。尤其是1999年启动实施的退耕还林还草工程，取得了明显的生态成效，黄土高原植被覆盖度显著提高，水土流失明显减弱，入黄泥沙大幅减少（刘国彬等，2017；Fu et al, 2017；胡春宏等，2020）。

当前，针对黄土高原大规模植被恢复和重建产生的生态、水文、侵蚀和气候效应已开展了大量的研究，取得了全面和深入的认识（Sun et al, 2006；Fu et al, 2011；Wang et al, 2011a；Lü et al, 2012；Feng et al, 2013；Zhao et al, 2013；Gao et al, 2018a；Zhang et al, 2021）。然而，黄土高原过度植被恢复产生的环境负效应也逐步显现（Wang et al, 2011b；邵明安等，2015；邵明安等，2016；Jia et al, 2017a），尤其是水资源的不可持续性问题十分严峻（Feng et al, 2016）。退耕还林还草工程实施至今仅20余年，从植被恢复的角度而言，时间不长，但生态系统的反馈非常强烈（Fu et al, 2017），这主要是短时期、高强度植被恢复的结果（金钊，2019）。从长期角度来看，例如未来50—100 a，黄土高原退耕还林还草工程的环境效应与可持续性如何，目前缺乏前瞻性的研究和科学认识。当前，黄土高原植被恢复已进入一个节点性时期，前期高强度的植被恢复实现了由黄到绿的转变，但黄土高原植被重建的终极目标是什么，并不十分明确。近几年，政府部门和学术界提出了由“浅绿”向“深绿”转变的目标（水利部，2021-09-08），但黄

土高原能否承载“深绿”，需要进行充分的科学论证。

针对上述问题，本文对在甘肃庆阳南小河沟长期退耕还林（杨家沟）和还草（董庄沟）小流域持续开展近10 a的观测研究成果进行总结分析，探讨长期自然和人为植被恢复背景下小流域的环境反馈和正负效应，希望能为黄土高原退耕还林还草工程的持续实施提供一些新认识，促进黄土高原植被恢复政策更加科学和完善。这两条小流域位置毗邻，流域面积和地形地貌相似，均从1954年开始实施退耕还林和还草，至今已近70 a，研究结果能为黄土高原退耕还林还草工程持续实施50—100 a可能产生的环境效应提供预测参考。

1 小流域退耕还林还草的生态效应

黄土高原退耕还林还草工程的大规模实施，产生了一系列生态效应，其中变化最为显著的是植被覆盖度的显著提高。已有研究表明：黄土高原植被覆盖度由2000年的27.4%增长至2019年的57.5%（Song et al, 2022），其中以陕北黄土高原的增绿最为显著，成为近20 a来全国植被增绿最为显著的区域（Lü et al, 2015），绿色向北推进了400 km。植被覆盖度的大幅增加，使生态系统的固碳能力显著增强。Lü et al（2012）研究发现：2000—2008年黄土高原植被恢复额外固定了3530万t碳，其中67%来自植被固碳，33%来自土壤固碳。Feng et al（2013）进一步研究发现：2000—2008年黄土高原生态系统额外的固碳量达到9610万t，并且土壤后续的固碳能力将更加明显。

在南小河沟退耕还林小流域，通过无人机搭载激光雷达进行的研究表明：退耕还林近70 a的森林小流域，平均树木覆盖度为55%（0.2%—100%），其中沟谷区域（沟沿线以下）为64%，沟坡区域（沟沿线以上）为47%。流域平均叶面积指数为0.52，其中沟谷区域为0.67，沟坡区域为0.36（Luo et al, 2021）。在退耕还林小流域，林下草本植被生长茂盛。通过样方调查发现，森林小流域林下草本植被的平均覆盖度为72%，其中沟谷区域为78%，沟坡区域为63%。在退耕还草小流域，草本植物的平均覆盖度为76%，其中沟谷区域为84%，沟坡区域为63%（Dang et al, 2022；Jin et al, 2022）。退耕还林和还草小流域植被覆盖度的调查结果表明：森林

小流域的林下草本植被覆盖度和自然恢复草地小流域差异不大,沟坡区域草本植被覆盖度相同,沟谷区域草地小流域植被覆盖略高于森林小流域的林下草本植被。但考虑森林小流域的树木覆盖度,长期退耕还林小流域的植被覆盖度远远高于长期退耕还草小流域。

从两条小流域 0—1 m 深度土壤容重、有机和无机碳储量及同位素比值的差异来看,植被自然恢复(退耕还草)更有利于表层土壤有机碳的积累,因此具有更高的有机碳储量(草地: $67.84 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$; 森林: $52.94 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) (Jin et al, 2014)。与此相反,长期退耕还林小流域具有更高的无机碳储量(草地: $194.29 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$; 森林: $233.28 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) (Jin et al, 2014)。然而,通过土壤碳酸盐同位素比值的分析发现:退耕还草小流域可能发生了更多的无机碳横向迁移和输出,其机制为草地小流域的水分条件、径流量、输沙量均显著高于退耕还林小流域,使得更多的土壤碳酸盐和土壤呼吸形成的 CO_2 溶解于水,并通过洪水径流带入到河流系统,形成一个长期被忽视的横向碳迁移过程。

两条小流域氮循环的研究表明:长期退耕还林和还草小流域土壤氮库储量无显著差异,但森林小流域土壤的硝态氮含量明显高于草地小流域 (Jin et al, 2016)。此外,森林小流域凋落物的全氮含量及稳定同位素比值 ($\delta^{15}\text{N}$) 也明显高于草地小流域,表明长期退耕还林并没有显著降低土壤的氮素养分含量,也没有出现持续性的氮限制现象,反而土壤氮素养分明显高于植被自然恢复土壤。其原因可能为:(1)退耕还林小流域的主要造林树种为刺槐。刺槐是重要的生物固氮树种,生物固氮作用为人工造林土壤提供了氮素养分,并转化为硝态氮保存在土壤中;(2)退耕还林小流域较低的径流量和干燥的土壤条件更有利于土壤硝态氮的保存 (Jin et al, 2016)。在上述基础上,进一步分析土壤硝态氮 N/O 稳定同位素 ($\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$) 发现:人工造林土壤的硝态氮主要来源于土壤氮素的转化(硝化作用),而植被自然恢复土壤硝态氮可能来自以前人工施用氮肥的残存 (Jin et al, 2016)。

土壤 pH 是控制小流域生物地球化学循环的关键化学参数。两条小流域的对比研究表明:长期植树造林显著降低了沟谷区域的土壤 pH (0—80 cm 深度),降低范围为 0.02—0.15 个单位 (Jin

et al, 2022); 在沟坡区域,植树造林对土壤 pH 无显著影响。在退耕还林小流域,沟谷区域土壤 pH 降低与土壤全氮和有机碳含量呈显著的线性负相关关系。此外,流域微地形对土壤 pH 有显著影响。在退耕还林小流域,沟谷区域土壤 pH 显著低于沟坡区域,而退耕还草小流域正好相反。小流域长期退耕还林后,沟谷区域密集分布的树木和林下植被,使得养分物质聚集,土壤酸化作用更为显著,从而使退耕还林小流域沟谷区域土壤 pH 低于沟坡区域;而退耕还草小流域沟谷频繁发生的重力侵蚀为坡面带来新鲜的碱性黄土物质,使沟谷区域土壤 pH 高于沟坡区域。上述研究结果为深入理解人工植树造林和微地形对小流域土壤 pH 的影响及相关的生物地球化学过程提供了新认识。

2 小流域退耕还林还草的水文效应

水资源平衡问题是黄土高原植被恢复需要关注的核心问题。已有研究表明:黄土高原过度植被恢复导致深层土壤出现干燥化现象,土壤水资源亏缺严重 (邵明安等, 2015; Shao et al, 2018)。Jia et al (2017b) 计算了黄土高原 169 个样点植树造林前后 0—5 m 深度土壤水分的变化,发现 1—5 m 深度土壤水分储量降低了 203.7 mm,年均降低 16.2 mm。此外,Shao et al (2019) 研究发现,黄土高原退耕还林还草工程实施后的 15 a 间 (2001—2015),蒸散发 (ET) 年均增加 4.39 mm。和不实施退耕还林还草情景相比,退耕还林还草工程在 15 a 间通过蒸散作用额外损失了 270 亿 m^3 的水量,年均损失 18 亿 m^3 。Feng et al (2016) 研究发现:在当前气候条件下,黄土高原能够承载的植被净初级生产力 (NPP) 极限为 395—405 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (以碳计),而 2008 年黄土高原的实际 NPP 已经接近 400 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,表明黄土高原植被恢复已经趋近水资源可持续利用的极限。蒸散量增加、土壤水分含量降低的直接结果是流域产水量显著下降。Zheng et al (2021) 研究表明:和 1961—1999 年相比,2000—2015 年黄土高原 16 个典型流域平均径流系数下降了 26%—76%,其中 5 个流域的径流系数下降超过 50%,表明退耕还林还草工程导致流域产水能力出现普遍下降。

植被恢复除增加土壤水分消耗外,一个重要影响是大大增加了植被冠层的截流作用。在这种背景下,需要回答的一个重要科学问题是在植被覆盖度高的流域,多大的降雨才能入渗到表层土

壤。针对这个科学问题，通过南小河沟长期退耕还林和还草小流域的对比观测，揭示了小流域在长期自然和人为植被恢复模式下降雨补给土壤水分的阈值条件和影响因素，即多大的降雨才能补给土壤的问题。研究表明：针对高植被覆盖的草地和低植被覆盖的森林坡地，单次或连续降雨量达到 9 mm 才能入渗到表层土壤（10 cm）；而对于高植被覆盖的沟谷森林，降雨量达到 14 mm 才能有效补给到表层土壤（Jin et al, 2018）。植被盖度、地形条件和降雨特性（降雨强度、降雨量等）是影响降雨有效补给土壤的三个重要控制因素。在同等条件下，土壤水分的补给主要来自降雨总量大、降雨强度高的少数几场降雨（Jin et al, 2018）。

近年来，国内部分学者提出黄土高原的降雨—产流机制正在发生重大变化，部分地区出现了从“超渗产流”向“蓄满产流”转变的趋势（穆兴民等，2019）。当前，黄土高原在大规模植被恢复背景下，小流域的产水能力和产水机制如何变化，水资源的未来发展趋势是什么，是需要迫切回答的科学问题。针对这一问题，继续以南小河沟退耕还林和还草小流域为研究对象，探讨了自然和人为植被恢复模式下小流域产水能力和产水机制的差异。研究表明：2017—2018 年退耕还草小流域的平均产流系数为 0.042，是退耕还林小流域产流系数的 10 倍（0.004），从实测角度论证了人工植树造林极大地抑制了小流域的产水能力（Jin et al, 2020）。前人研究表明：植被恢复后的前 20 多年（1956—1980 年），退耕还林小流域的径流量降低了 32%（Huang et al, 2003）；而经过 70 a 的人工造林恢复，现今退耕还林小流域径流量降低了 90%。

从产水机制来看，人工植树造林彻底改变了小流域的水文过程。例如在退耕还草小流域，最高降雨强度是影响小流域产流系数的第一控制因素，而在退耕还林小流域没有发现任何线性关系。此外，在退耕还草小流域，产流系数与流域前期土壤含水量和总湿度指数存在非线性阈值关系，即当前期土壤含水量超过 18% 或流域总湿度超过 210 mm（当次产流的降雨量 + 降雨前土壤水分储量），小流域径流系数急剧升高，但在退耕还林小流域没有发现这一现象（Jin et al, 2020）。在退耕还草小流域，沟坡和沟谷区域均没有出现土壤饱和（蓄满产流）现象，但在退耕还林小流域，

沟谷区域出现了较短时间的土壤饱和。在研究期间（2017—2018 年），退耕还草小流域出现了两次超高产流系数事件，产流系数分别为 23.7% 和 27.3%，大约是平均产流系数的 6—8 倍，表明大量的降雨形成了出山径流。分析表明：产流系数为 23.7% 的这一事件，主要是高强度的降雨产生了强的地表径流，使得流域沟坡和沟谷区域产生了水文连通，从而出现了较强的产流；而产流系数为 27.3% 的这一事件，主要由高的降雨量、前期土壤含水量和流域总湿度共同导致。在此次事件中，流域沟坡和沟谷区域没有产生水文连通，流域产流主要来自沟谷区域（Jin et al, 2020）。

3 小流域退耕还林还草的减沙效应

侵蚀泥沙问题是黄土高原生态建设需要解决的根本问题。近 70 a 来，黄土高原的侵蚀环境发生了巨大变化，尤其是 1999 年退耕还林还草工程实施以来，黄土高原土壤侵蚀明显减弱（Wang et al, 2016a; Wang et al, 2016b; Fu et al, 2017; Gao et al, 2017; Zhang et al, 2019）。Fu et al（2011）计算了 2000—2008 年黄土高原土壤侵蚀强度的变化，发现 8° — 15° 坡面土壤侵蚀强度从 $5000 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 降至 $3600 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ， 15° — 25° 坡面土壤侵蚀强度从 $6900 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 降至 $4700 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ， 25° — 35° 坡面土壤侵蚀强度从 $8500 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 降至 $5500 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。然而，坡度大于 8° 的坡面土壤侵蚀速率仍然高于 $3600 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ，远高于 $1000 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的土壤容许流失率。Zhao et al（2013）对比分析了黄土高原 1955—1969 年和 2000—2009 年两个不同时段土壤侵蚀强度的变化，结果表明：1955—1969 年，黄土高原土壤侵蚀强度高于 $8000 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的重侵蚀区域为 7.86 万 km^2 ，而在 2000—2009 年，黄土高原土壤侵蚀强度高于 $11000 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的区域消失了，侵蚀强度高于 $8000 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的重侵蚀区域仅为 923 km^2 ；该时期，黄土高原 52.5 万 km^2 的区域侵蚀强度低于 $1000 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ，约占黄土高原总面积的 80%。尽管上述两项研究结果存在一定差异，即 Zhao et al（2013）计算得到的黄土高原土壤侵蚀强度的减少幅度高于 Fu et al（2011）的计算结果，但变化趋势是一致的，即退耕还林还草工程的实施大大抑制了黄土高原的坡面侵蚀。

黄土高原土壤侵蚀强度降低的直接结果是入黄泥沙显著减少。20 世纪 70 年代末期，黄河输沙

量为 $16 \text{ 亿 t} \cdot \text{a}^{-1}$, 2000—2015 年黄河潼关水文站年输沙量平均为 2.56 亿 t, 特别是在年降雨量没有明显变化的情况下, 2008 年和 2009 年黄河输沙量仅为 1.34 亿 t 和 1.98 亿 t, 2015 年降低至 1 亿 t, 接近宋朝时期水平 (Wang et al, 2007; Jin et al, 2012; 穆兴民等, 2017; 胡春宏等, 2020)。Wang et al (2007) 发现 1950—2005 年的 56 a 间, 黄河输沙量的降低 (花园口站) 30% 归因于降雨减少, 30% 归因于黄河干流大坝和水库的建设, 40% 归因于水土保持措施。Wang et al (2016b) 利用黄土高原和黄河过去 60 a 的降水、径流和泥沙观测数据, 利用泥沙归因分析的方法计算了各因素的贡献及其作用, 结果表明: 黄河 58% 的输沙量减少是由产流能力降低引起的, 其次是产沙能力 (30%) 和降水 (12%) 的贡献。坝库、梯田等工程措施是 20 世纪 70 年代至 90 年代黄土高原产沙减少的主要原因, 占 54%。2000 年以来, 随着退耕还林还草工程的实施, 植被措施成为了土壤保持的主要贡献者, 占 57%。Wang et al (2016b) 认为, 随着坝库等工程措施拦沙能力的逐渐下降, 在黄土高原维持一个可持续的植被生态系统对有效保持土壤和控制黄河输沙量反弹具有重要的作用。

小流域是黄土高原土壤侵蚀和泥沙输出的基本单元。20 世纪 80 年代首次提出以小流域为单元的水土流失综合治理理念以来, 小流域综合治理为控制黄土高原土壤侵蚀和减少入黄泥沙发挥了至关重要的作用。郑明国等 (2021) 以 2017 年陕西榆林发生的“7·26”特大暴雨为例, 计算了极端降雨情形下岔巴沟流域水土保持治理的减沙效益, 结果表明: “7·26”暴雨中, 岔巴沟流域水土保持治理使洪水平均含沙量减小 83%, 径流减小 55.1%, 流域治理的总减沙效益高达 92.4%; 总减沙效益中, 55.1% 的贡献来自坡面措施, 37.3% 来自沟道淤地坝措施。肖培青等 (2020) 对近 10 a 大暴雨作用下 4 个典型流域的水土保持措施减沙作用进行了系统分析和研究, 结果表明: 佳芦河流域水土保持措施在 2012 年的“7·27”大暴雨中减沙效益为 65.4%; 杏子河流域在 2013 年的“7·12”、“7·25”和“7·27”连续三场降雨中, 水土保持措施减沙效益分别为 56.5%、40.7% 和 36.5%; 西柳沟流域上游在 2016 年“8·17”大暴雨中, 林草植被措施减沙效益达 84.2%; 岔巴沟流域在 2017 年的“7·26”大暴雨中, 水土保持

措施减沙效益为 79%。

针对南小河沟长期退耕还林和还草小流域, 穆兴民等 (1999) 对比分析了两条小流域 1954—1980 年暴雨径流的差异, 发现退耕还林小流域的产洪次数明显减少。森林小流域平均年产洪 10.8 次, 草地小流域为 14.2 次, 年产洪次数减少 22%; 特别是在治理中期 (1958—1966 年), 平均产洪次数减少 28%。通过分析 1954—1976 年两条小流域的产沙数据, 得到草地小流域的产沙模数为 $3551 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 森林小流域的产沙模数为 $879 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 前者是后者的 4 倍, 表明人工植树造林结合其他小型水土保持工程措施, 能够起到明显的减沙效果。近 5 a (2016—2020 年) 的产沙数据表明: 草地小流域的产沙模数为 $3066 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 森林小流域的产沙模数为 $35 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 前者是后者的 87.6 倍。该结果说明经过长达 70 a 的持续森林建设, 退耕还林小流域在水资源被极度消耗的同时, 也基本实现没有泥沙产出。

4 小流域退耕还林还草的气候和能量效应

人工植树造林的气候和能量效应是近年来全球变化研究的热点 (Bonan et al, 2008)。Li et al (2016) 评估了全球毁林和造林对陆地表层温度的影响, 发现在低纬和中纬人工植树造林起到降温作用, 但在高纬起到增温作用; Peng et al (2014) 发现我国大规模人工造林降低了白天、增加了夜晚的陆地表层温度, 最终对区域气候起到降温作用。Zhang and Liang (2018) 评估了我国土地利用和覆被变化对陆地表层温度的影响, 发现草地转换为森林同时降低了白天和夜晚的陆地表层温度。

黄土高原由于大规模的人工植树造林和植被恢复, 导致 ET 增强, 地表反照率下降, 对区域气候和能量平衡也产生了明显的影响。Xiao (2014) 发现黄土高原退耕还林还草工程使森林面积大幅增加, 导致地表反照率显著降低, 对区域气候产生了加热效应; 而 ET 增强需要消耗更多的热量, 使黄土高原白天地表温度下降, 对区域气候起到了降温作用。因此, 黄土高原退耕还林还草工程对区域气候的影响取决于蒸散增加产生的负效应与地表反照率下降产生的正效应之间的平衡。张宝庆等 (2021) 最新研究表明, 植被恢复对黄土高原局地降水量的增加具有积极效应。2000—2015 年, 黄土高原降水量以 $7.84 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-2}$ 的速率显著增

加, 模拟结果显示大规模植被恢复对黄土高原降水量增加的贡献约为 37%, 而外部水汽环流变化对降水量增加的贡献约占 63%。与不考虑植被恢复情景相比, 考虑植被恢复情景下黄土高原的年均降水量高 12.4%。

通过对南小河沟长期退耕还林和还草小流域近地表 (1 m 高度) 和土壤 (1 m 深度) 温度的对比观测研究表明, 除植树造林显著改变流域的能量平衡外, 局部地形的影响不可忽视 (Jin et al, 2019)。地形对地温和气温的影响随季节的变化而变化, 并与植被生长的影响相互作用。在冬春季, 由于不同坡位接受太阳辐射的不同, 地形是影响地表能量平衡的主导因素; 而在夏季, 随着植被蒸腾作用的增强, 植被对地表能量平衡的影响逐渐超过地形因素, 成为影响流域地温和气温的主导因素 (Jin et al, 2019)。与退耕还草小流域相比, 退耕还林小流域表现出白天和夜晚均降温的作用, 不同于过去认为的白天降温、夜晚增温的模式。因此, 从小流域角度而言, 地形要素和植树造林对地表能量平衡的影响同等重要, 两者均是影响黄土高原区域地表能量平衡的重要因素。

5 从小流域视角看黄土高原退耕还林还草的可持续性

从小流域视角来看, 黄土高原退耕还林的可持续性取决于水沙平衡, 即保持合理的径流和泥沙输出量。这涉及一个重要问题, 即黄河输沙量维持在什么水平才是科学合理的。黄河输沙量的水平决定了黄土高原退耕还林还草工程实施的强度和持续的时间。当前, 在年降雨量没有明显减少的情况下, 2001—2018 年黄河潼关站年平均输沙量为 2.44 亿 t (胡春宏等, 2020)。这种输沙量水平是否合理, 未来黄河是需要维持更高的输沙量, 还是更低的输沙量? 胡春宏 (2016)、王光谦等 (2020)、胡春宏等 (2022) 预估, 未来 50—100 a 黄河潼关站年平均径流量将逐步稳定在 210 亿—247 亿 m^3 、输沙量将逐步稳定在 3 亿 t 左右。穆兴民等 (2020) 选择 1997—2019 年作为黄河未来输沙量预估的参考基准时段, 采用经验频率及滑动平均方法, 预测未来黄土年均输沙量为 1.4 亿 t 左右, 其中 90% 频率年份约为 1 亿 t, 10% 频率年份约为 5 亿 t。

从南小河沟长期退耕还林和还草小流域的对比观测结果来看, 长达 70 a 的人工植树造林使得

退耕还林小流域基本没有径流和泥沙输出。从系统科学而言, 这种现状对于维持退耕还林小流域自身系统的平衡和稳定没有问题, 但难以维持大系统的物质平衡, 即黄河的水沙平衡难以维持。已有研究结果表明, 由于黄河输沙量的急剧降低, 黄河三角洲将面临严峻的萎缩和海侵问题 (Bi et al, 2014; Gao et al, 2018b)。因此, 黄土高原水土保持治理需要从小流域治理向全流域协调转变 (Wang et al, 2016a; Wang et al, 2016b), 既要维持黄土高原生态保护的可持续性, 还要维持黄河流域的整体健康和高质量发展。针对当前黄土高原退耕还林还草工程取得的成绩和面临的挑战, 需要从两阶段论来看待这一问题。第一阶段为退耕还林还草工程实施至今 20 a (2000—2020 年)。这一阶段的主要目标是增加黄土高原植被覆盖度 (增绿), 控制土壤侵蚀 (控蚀), 减少入黄泥沙 (减泥沙)。第二阶段为未来 20—30 a (2021—2050 年)。这一阶段的主要目标是维持黄土高原植被覆盖度 (稳绿), 增加河流量 (增水), 开展关键区域侵蚀治理, 提高人地的协调性和经济社会发展水平 (促发展)。目前, 第一阶段目标已经实现, 现在工作的重点是需要针对第二阶段的目标开展规划和研究工作。

未来 20—30 a, 黄土高原植被恢复和生态系统管理方面, 需要加强植被自然恢复, 降低人工植树造林导致的水分蒸腾损失, 重点关注人工林种植密度问题, 开展疏伐试验, 提出科学合理的人工林种植密度和疏伐管理措施; 水资源管理方面, 加强雨水和河流水资源的利用效率, 大力发展节水灌溉技术, 合理增加河流量; 水土流失治理方面, 重点开展黄土塬区沟道侵蚀扩张和固沟保塬研究工作, 全面推动塬面的保护和治理, 控制塬面萎缩; 加强黄土丘陵沟壑区沟道工程治理, 提高暴雨洪水的调蓄能力; 人地协调方面, 加强黄土高原土地整治、城市建设和乡村振兴模式试验, 发展“一地一品牌”的特色经济产业, 提高人地关系的协调和经济社会发展水平。

6 结论

(1) 黄土高原实施退耕还林还草工程 20 余年, 区域的生态、水文、侵蚀和气候环境发生了巨大变化, 植被覆盖度增加一倍, 土壤水资源匮乏严重, 流域产水能力普遍下降, 坡面侵蚀明显减弱, 河流泥沙减少, 植被恢复对区域降雨量增

加呈现正效应。

(2) 小流域退耕还林 70 a, 其植被覆盖度明显高于退耕还草小流域, 两者之间的生态过程也出现明显分异; 与退耕还草小流域相比, 持续 70 a 的人工林恢复使退耕还林小流域的产水能力降低了 90%, 产流机制也发生明显变化; 退耕还林小流域在水资源被极度消耗的同时, 也基本实现没有泥沙产出; 从小流域角度而言, 地形要素和植树造林对地表能量平衡的影响同等重要。

(3) 退耕还林还草工程如果持续实施 50—100 a, 黄土高原水沙还将发生变化, 径流和泥沙将进一步减少。从黄土高原退耕还林还草工程的两阶段论来看, 第一阶段(2000—2020年)的主要目标是增绿、控蚀、减泥沙, 目前这一目标已经完成; 第二阶段(2021—2050年)的主要目标是稳绿、增水、促发展, 现在需要重点开展这方面的研究工作。

致谢: 感谢黄河水利委员会西峰水土保持科学试验站对本研究提供的支持和帮助, 感谢课题组所有工作人员和研究生持续 10 年的努力和坚持。论文在完稿过程中, 得到编辑部刘玉杰博士的支持和帮助, 在此一并感谢。

参考文献

安芷生, Porter S, Kukla G, 等. 1990. 最近 13 万年黄土高原季风变迁的磁化率证据 [J]. *科学通报*, 35(7): 529–532. [An Z S, Porter S, Kukla G, et al. 1990. Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation on the Loess Plateau of central China during the last 130,000 years [J]. *Chinese Science Bulletin*, 35(7): 529–532.]

郭正堂. 2017. 黄土高原见证季风和荒漠的由来 [J]. *中国科学: 地球科学*, 47(4): 421–437. [Guo Z T. 2017. Loess Plateau attests to the onsets of monsoon and deserts [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 47(4): 421–437.]

国家发展改革委, 水利部, 农业部, 等. 2010-12-30 [2022-03-20]. 黄土高原地区综合治理规划大纲(2010—2030年) [Z/OL]. http://www.gov.cn/zwgk/2011-01/17/content_1786454.htm. [National Development and Reform Commission of China, Ministry of Water Resources of China, Ministry of Agriculture of China, et al. 2010-12-30 [2022-03-20]. Planning outline for comprehensive remediation of the Loess Plateau region (2010—2030) [Z/OL]. [http://www.gov.cn/zwgk/2011-](http://www.gov.cn/zwgk/2011-01/17/content_1786454.htm)

[01/17/content_1786454.htm](http://www.gov.cn/zwgk/2011-01/17/content_1786454.htm).]

国家发展改革委, 自然资源部. 2020-06-03 [2022-03-20]. 全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035年) [Z/OL]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202006/t20200611_1231112.html?code=&state=123. [National Development and Reform Commission of China, Ministry of Natural Resources of China. 2020-06-03 [2022-03-20]. Master plan of major projects for the protection and restoration of China's important ecosystems (2021—2035) [Z/OL]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202006/t20200611_1231112.html?code=&state=123.]

胡春宏, 张晓明, 赵阳. 2020. 黄河泥沙百年演变特征与近期波动变化成因解析 [J]. *水科学进展*, 31(5): 725–733. [Hu C H, Zhang X M, Zhao Y. 2020. Cause analysis of the centennial trend and recent fluctuation of the Yellow River sediment load [J]. *Advances in Water Science*, 31(5): 725–733.]

胡春宏, 张双虎, 张晓明. 2022. 新形势下黄河水沙调控策略研究 [J]. *中国工程科学*, 24(1): 122–130. [Hu C H, Zhang S H, Zhang X M. 2022. Research on water and sediment regulation of the Yellow River under new situation [J]. *Strategic Study of CAE*, 24(1): 122–130.]

胡春宏. 2016. 黄河水沙变化与治理方略研究 [J]. *水力发电学报*, 35(10): 1–11. [Hu C H. 2016. Changes in runoff and sediment loads of the Yellow River and its management strategies [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 35(10): 1–11.]

金钊. 2019. 走进新时代的黄土高原生态恢复与生态治理 [J]. *地球环境学报*, 10(3): 316–322. [Jin Z. 2019. Ecological restoration and management in the Loess Plateau entering the new era [J]. *Journal of Earth Environment*, 10(3): 316–322.]

刘国彬, 上官周平, 姚文艺, 等. 2017. 黄土高原生态工程的生态成效 [J]. *中国科学院院刊*, 32(1): 11–19. [Liu G B, Shangguan Z P, Yao W Y, et al. 2017. Ecological effects of soil conservation in Loess Plateau [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 32(1): 11–19.]

穆兴民, 顾朝军, 孙文义, 等. 2019. 植被恢复改变黄土高原产流模式问题初探 [J]. *人民黄河*, 41(10): 31–39. [Mu X M, Gu C J, Sun W Y, et al. 2019. Preliminary assessment effect of vegetation restoration on runoff generation pattern of the Loess Plateau [J]. *Yellow River*, 41(10): 31–39.]

- 穆兴民, 胡春宏, 高 鹏, 等. 2017. 黄河输沙量研究的几个关键问题与思考 [J]. *人民黄河*, 39(8): 1–4, 48. [Mu X M, Hu C H, Gao P, et al. 2017. Key issues and reflections of research on sediment flux of the Yellow River [J]. *Yellow River*, 39(8): 1–4, 48.]
- 穆兴民, 王文龙, 徐学选. 1999. 黄土高原沟壑区水土保持对小流域地表径流的影响 [J]. *水利学报*, 30(2): 71–75. [Mu X M, Wang W L, Xu X X. 1999. The influence of the soil and water conservation on the surface runoff in the watersheds in the gully plateau region of Loess Plateau [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 30(2): 71–75.]
- 穆兴民, 赵广举, 高 鹏, 等. 2020. 黄河未来输沙量态势及其适用性对策 [J]. *水土保持通报*, 40(5): 328–332. [Mu X M, Zhao G J, Gao P, et al. 2020. Future trend of sediment discharge in Yellow River and its adaptation strategies [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 40(5): 328–332.]
- 彭建兵, 兰恒星, 钱 会, 等. 2020. 宜居黄河科学构想 [J]. *工程地质学报*, 28(2): 189–201. [Peng J B, Lan H X, Qian H, et al. 2020. Scientific research framework of livable Yellow River [J]. *Journal of Engineering Geology*, 28(2): 189–201.]
- 邵明安, 贾小旭, 王云强, 等. 2016. 黄土高原土壤干层研究进展与展望 [J]. *地球科学进展*, 31(1): 14–22. [Shao M A, Jia X X, Wang Y Q, et al. 2016. A review of studies on dried soil layers in the Loess Plateau [J]. *Advances in Earth Science*, 31(1): 14–22.]
- 邵明安, 王云强, 贾小旭. 2015. 黄土高原生态建设与土壤干燥化 [J]. *中国科学院院刊*, 30(S1): 178–185. [Shao M A, Wang Y Q, Jia X X. 2015. Ecological construction and soil desiccation on the Loess Plateau of China [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 30(S1): 178–185.]
- 水利部. 2021-09-08 [2022-03-20]. 推动黄河流域水土保持高质量发展的指导意见 [Z/OL]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5659523.htm. [Ministry of Water Resources of China. 2021-09-08 [2022-03-20]. Guidelines for promoting high-quality development of soil and water conservation in the Yellow River Basin [Z/OL]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5659523.htm.]
- 王光谦, 钟德钰, 吴保生. 2020. 黄河泥沙未来变化趋势 [J]. *中国水利*, (1): 9–12, 32. [Wang G Q, Zhong D Y, Wu B S. 2020. Future trend of Yellow River sediment changes [J]. *China Water Resources*, (1): 9–12, 32.]
- 肖培青, 王玲玲, 杨吉山, 等. 2020. 大暴雨作用下黄土高原典型流域水土保持措施减沙效益研究 [J]. *水利学报*, 51(9): 1149–1156. [Xiao P Q, Wang L L, Yang J S, et al. 2020. Study on sediment reduction benefits of soil and water conservation measures in typical watersheds in the Loess Plateau under the heavy rainfall [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 51(9): 1149–1156.]
- 张宝庆, 田 磊, 赵西宁, 等. 2021. 植被恢复对黄土高原局地降水的反馈效应研究 [J]. *中国科学: 地球科学*, 51(7): 1080–1091. [Zhang B Q, Tian L, Zhao X N, et al. 2021. Feedbacks between vegetation restoration and local precipitation over the Loess Plateau in China [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 51(7): 1080–1091.]
- 郑明国, 梁 晨, 廖义善, 等. 2021. 极端降雨情形下黄土区水土保持治理的减沙效益估算 [J]. *农业工程学报*, 37(5): 147–156. [Zheng M G, Liang C, Liao Y S, et al. 2021. Estimation of sediment reduction benefit by soil and water conservation under extreme rainfall in a loess watershed [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 37(5): 147–156.]
- 朱显谟. 1998. 黄土高原国土整治“28 字方略”的理论与实践 [J]. *中国科学院院刊*, 13(3): 232–236. [Zhu X M. 1998. Theory and practice of “28 Character Strategy” for territorial regulation in the Loess Plateau [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 13(3): 232–236.]
- Bi N S, Wang H J, Yang Z S. 2014. Recent changes in the erosion-accretion patterns of the active Huanghe (Yellow River) delta lobe caused by human activities [J]. *Continental Shelf Research*, 90: 70–78.
- Bonan G B. 2008. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests [J]. *Science*, 320(5882): 1444–1449.
- Dang H, Li J H, Xu J S, et al. 2022. Differences in soil water and nutrients under catchment afforestation and natural restoration shape herbaceous communities on the Chinese Loess Plateau [J]. *Forest Ecology and Management*, 505: 119925. DOI: 10.1016/j.foreco.2021.119925.
- Feng X, Fu B, Lu N, et al. 2013. How ecological restoration alters ecosystem services: an analysis of carbon sequestration in China's Loess Plateau [J]. *Scientific Reports*, 3: 2846. DOI: 10.1038/srep02846.

- Feng X, Fu B, Piao S, et al. 2016. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits [J]. *Nature Climate Change*, 6(11): 1019–1022.
- Fu B J, Liu Y, Lü Y H, et al. 2011. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China [J]. *Ecological Complexity*, 8(4): 284–293.
- Fu B J, Wang S, Liu Y, et al. 2017. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 45: 223–243.
- Gao G Y, Fu B J, Zhang J J, et al. 2018a. Multiscale temporal variability of flow-sediment relationships during the 1950s — 2014 in the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Hydrology*, 563: 609–619.
- Gao G Y, Zhang J J, Liu Y, et al. 2017. Spatio-temporal patterns of the effects of precipitation variability and land use/cover changes on long-term changes in sediment yield in the Loess Plateau, China [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(9): 4363–4378.
- Gao P, Wang Y M, Li P F, et al. 2018b. Land degradation changes in the Yellow River Delta and its response to the streamflow-sediment fluxes since 1976 [J]. *Land Degradation & Development*, 29(9): 3212–3220.
- Huang M B, Zhang L, Gallichand J. 2003. Runoff responses to afforestation in a watershed of the Loess Plateau, China [J]. *Hydrological Processes*, 17(13): 2599–2609.
- Jia X X, Shao M A, Zhu Y J, et al. 2017a. Soil moisture decline due to afforestation across the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Hydrology*, 546: 113–122.
- Jia X X, Wang Y Q, Shao M A, et al. 2017b. Estimating regional losses of soil water due to the conversion of agricultural land to forest in China's Loess Plateau [J]. *Ecohydrology*, 10(6): e1851. DOI: 10.1002/eco.1851.
- Jin Z, Cui B L, Song Y, et al. 2012. How many check dams do we need to build on the Loess Plateau? [J]. *Environmental Science & Technology*, 46(16): 8527–8528.
- Jin Z, Dong Y S, Wang Y Q, et al. 2014. Natural vegetation restoration is more beneficial to soil surface organic and inorganic carbon sequestration than tree plantation on the Loess Plateau of China [J]. *Science of the Total Environment*, 485/486: 615–623.
- Jin Z, Guo L, Fan B H, et al. 2019. Effects of afforestation on soil and ambient air temperature in a pair of catchments on the Chinese Loess Plateau [J]. *Catena*, 175: 356–366.
- Jin Z, Guo L, Lin H, et al. 2018. Soil moisture response to rainfall on the Chinese Loess Plateau after a long-term vegetation rehabilitation [J]. *Hydrological Processes*, 32(12): 1738–1754.
- Jin Z, Guo L, Yu Y L, et al. 2020. Storm runoff generation in headwater catchments on the Chinese Loess Plateau after long-term vegetation rehabilitation [J]. *Science of the Total Environment*, 748: 141375. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141375.
- Jin Z, Luo D, Yu Y L, et al. 2022. Soil pH changes in a small catchment on the Chinese Loess Plateau after long-term vegetation rehabilitation [J]. *Ecological Engineering*, 175: 106503. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2021.106503.
- Jin Z, Li X R, Wang Y Q, et al. 2016. Comparing watershed black locust afforestation and natural revegetation impacts on soil nitrogen on the Loess Plateau of China [J]. *Scientific Reports*, 6: 25048. DOI: 10.1038/srep25048.
- Li Y, Zhao M S, Mildrexler D J, et al. 2016. Potential and actual impacts of deforestation and afforestation on land surface temperature [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(24): 14372–14386.
- Lü Y H, Fu B J, Feng X M, et al. 2012. A policy-driven large scale ecological restoration: quantifying ecosystem services changes in the Loess Plateau of China [J]. *PLoS One*, 7(2): e31782. DOI: 10.1371/journal.pone.0031782.
- Lü Y H, Zhang L W, Feng X M, et al. 2015. Recent ecological transitions in China: greening, browning and influential factors [J]. *Scientific Reports*, 5: 8732. DOI: 10.1038/srep08732.
- Luo D, Jin Z, Yu Y L, et al. 2021. Effects of topography on planted trees in a headwater catchment on the Chinese Loess Plateau [J]. *Forests*, 12(6): 792. DOI: 10.3390/f12060792.
- Peng S S, Piao S L, Zeng Z Z, et al. 2014. Afforestation in China cools local land surface temperature [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(8): 2915–2919.
- Shao M A, Wang Y Q, Xia Y Q, et al. 2018. Soil drought and water carrying capacity for vegetation in the critical zone of the Loess Plateau: a review [J]. *Vadose Zone Journal*, 17(1): 170077. DOI: 10.2136/vzj2017.04.0077.
- Shao R, Zhang B Q, Su T X, et al. 2019. Estimating the

- increase in regional evaporative water consumption as a result of vegetation restoration over the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(22): 11783–11802.
- Song Y, Wang Y Q, Jin L, et al. 2022. Quantitative contribution of the Grain for Green project to vegetation greening and its spatiotemporal variation across the Chinese Loess Plateau [J]. *Land Degradation & Development*. Online. DOI: 10.1002/ldr.4269.
- Sun G, Zhou G Y, Zhang Z Q, et al. 2006. Potential water yield reduction due to forestation across China [J]. *Journal of Hydrology*, 328(3/4): 548–558.
- Wang H J, Yang Z S, Saito Y, et al. 2007. Stepwise decreases of the Huanghe (Yellow River) sediment load (1950–2005): impacts of climate change and human activities [J]. *Global and Planetary Change*, 57(3/4): 331–354.
- Wang S, Fu B J, Liang W. 2016a. Developing policy for the Yellow River sediment sustainable control [J]. *National Science Review*, 3(2): 162–164.
- Wang S, Fu B J, Piao S L, et al. 2016b. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes [J]. *Nature Geoscience*, 9(1): 38–41.
- Wang Y H, Yu P T, Feger K H, et al. 2011a. Annual runoff and evapotranspiration of forestlands and non-forestlands in selected basins of the Loess Plateau of China [J]. *Ecohydrology*, 4(2): 277–287.
- Wang Y Q, Shao M A, Zhu Y J, et al. 2011b. Impacts of land use and plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(4): 437–448.
- Xiao J F. 2014. Satellite evidence for significant biophysical consequences of the “Grain for Green” Program on the Loess Plateau in China [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 119(12): 2261–2275.
- Zhang B Q, Tian L, Zhao X N, et al. 2021. Feedbacks between vegetation restoration and local precipitation over the Loess Plateau in China [J]. *Science China Earth Sciences*, 64(6): 920–931.
- Zhang J J, Gao G Y, Fu B J, et al. 2019. Formulating an elasticity approach to quantify the effects of climate variability and ecological restoration on sediment discharge change in the Loess Plateau, China [J]. *Water Resources Research*, 55(11): 9604–9622.
- Zhang Y Z, Liang S L. 2018. Impacts of land cover transitions on surface temperature in China based on satellite observations [J]. *Environmental Research Letters*, 13(2): 024010. DOI: 10.1088/1748-9326/aa9e93.
- Zhao G, Mu X, Wen Z, et al. 2013. Soil erosion, conservation, and eco-environment changes in the Loess Plateau of China [J]. *Land Degradation & Development*, 24(5): 499–510.
- Zheng H Y, Miao C Y, Zhang G H, et al. 2021. Is the runoff coefficient increasing or decreasing after ecological restoration on China’s Loess Plateau? [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 9(3): 333–343.