

DOI: 10.5846/stxb201909041842

杨磊, 张子豪, 李宗善. 黄土高原植被建设与土壤干燥化: 问题与展望. 生态学报, 2019, 39(20): - .

Yang L, Zhang Z H, Li Z S. Effects of large-scale re-vegetation on soil desiccation in the Loess Plateau: problems and perspectives. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): - .

黄土高原植被建设与土壤干燥化: 问题与展望

杨 磊^{1, 2}, 张子豪^{1, 2}, 李宗善^{1, *}

1 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 黄土高原大规模植被建设有效减少了水土流失, 改善了区域生态环境, 大规模人工植被种植也造成了土壤水分的过度消耗, 导致了土壤干燥化, 成为当前黄土高原生态恢复的重要制约因素, 威胁区域生态系统健康与稳定。系统综述了黄土高原地区人工植被恢复对土壤干燥化的作用机制, 植被群落特征与土壤干燥化的耦合关系, 多尺度土壤干燥化时空分异规律及其影响因素, 明确了当前大规模人工植被恢复过程中土壤水分持续利用面临的问题与挑战。建议今后加强植被动态对水文过程影响的研究, 明确多尺度植被格局与土壤干燥化时空分异的耦合关系, 系统开展变化环境下不同尺度植被与土壤水分相互作用的模拟研究, 探讨基于植被格局优化的土壤水分调控机制, 维护黄土高原地区土壤安全, 提升区域生态系统服务功能。

关键词: 土壤水分; 植被恢复; 植被动态; 格局优化; 土壤安全

Effects of large-scale re-vegetation on soil desiccation in the Loess Plateau: problems and perspectives

YANG Lei^{1, 2}, ZHANG Zihao^{1, 2}, LI Zongshan^{1, *}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Large-scale re-vegetation of the Loess Plateau has been effective in decreasing serious soil erosion and improving the local environment. The human-introduced vegetation has become the main vegetation type in this region. However, large-scale human-introduced vegetation excessively consumes soil water. Soil desiccation is now observed across the entire Loess Plateau, and has become an important limitation for ecological restoration in this critical region, where it threatens the health and stability of regional ecosystems. In this paper, we summarize the role of human-introduced vegetation on soil desiccation in the Loess Plateau; present our analysis of the spatial and temporal variability of soil desiccation and the effect of associated factors on scales from the hillslope to regional level; discuss the coupling relationships between plant community features, soil properties, topographical features, and soil desiccation; and identify the problems and challenges of sustainable utilization of soil water under the influence of large-scale vegetation restoration in the Loess Plateau. We suggest that future studies should focus on the role of vegetation dynamics in hydrological processes. We also emphasize that subsequent studies should seek to clarify the coupling relationships between multi-scale vegetation patterns and spatial and temporal variations in soil desiccation, as well as conducting simulation studies on the spatial and temporal variability of soil desiccation at different scales. Methods of decreasing soil desiccation based on vegetation pattern optimization at different

基金项目: 中国科学院科技服务网络计划 (KFJ-STZ-ZDTP-036), 国家重点研发计划 (2016YFC0501701), 国家自然科学基金 (41871194) 资助

收稿日期: 2019-09-04; **修订日期:** 2019-10-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zsli_st@rcees.ac.cn

scales can provide reasonable and effective approaches to sustaining vegetation restoration and enhancing soil security in the Loess Plateau.

Key Words: soil water; vegetation restoration; vegetation dynamics; pattern optimization; soil security

土壤水分是地球表层多个生态过程的重要纽带,直接影响着陆地生态系统的结构、过程和功能^[1]。土壤水分不足是干旱、半干旱地区植被恢复和生态系统服务维持的重要制约因素,不同时空尺度植被与土壤水分的相互作用关系一直是生态恢复领域的核心科学问题和重点研究内容。尤其在黄土高原地区,土壤水分是植被生长所需的主要水分来源,土壤水分不足已成为这一区域生态恢复与重建的关键制约因素^[2,3]。长期以来,黄土高原人工植被恢复有效缓解了这一地区严重的水土流失状况,尤其是大规模退耕还林还草工程的实施,有效提升了包括土壤保持、固碳等在内的多种生态系统服务功能^[4]。全国生态环境十年变化(2000—2010年)遥感调查表明,黄土高原是我国植被覆盖增加最为明显的区域^[5],人工植被已成为这一地区主要的植被类型。然而,当前的植被恢复和布局方式也导致了土壤水分的过度消耗,人工植被对土壤水分的长期多度消耗超出了降水的补偿,导致干燥化现象的出现^[3, 6-7]。土壤干燥化是土壤水分含量某一段时间或长期低于自然植被的水文现象。土壤出现干燥化以后难以为地上植被提供充足的水分来源,不利于人工植被的持续稳定生长^[8],大范围的土壤干燥化势必影响植被恢复的可持续性和生态系统的稳定性,对区域生态安全造成威胁。本文针对黄土高原土壤干燥化现象形成的气候背景,着重从土壤干燥化的植被驱动过程、土壤干燥化时空分异的环境因素以及土壤水分的可持续利用等几个方面,讨论黄土高原大规模植被建设与土壤干燥化研究面临的问题与挑战。

1 土壤干燥化的气候背景

土壤水分含量是水分输入(降雨)和输出(蒸发、蒸腾和渗漏)综合作用的结果。黄土高原大部分地区年降水量为400—600 mm,而潜在蒸发量为800—1000 mm^[9],降水量少而潜在蒸发量大的干旱、半干旱气候是这一地区土壤水分不足的气候背景。另一方面,黄土高原降水集中在夏季,且多以暴雨形式呈现,雨强大、历时短,不利于降水入渗,使得土壤水分有效补给不足^[10]。从区域分异上来看,黄土高原从东南到西北降水逐渐减少,使得土壤水分含量沿着这一降水梯度也逐渐减少^[11],和降水量与蒸散量的比值相对应^[9],这也是土壤干燥化在黄土高原区域尺度空间分异的重要影响因素。近几十年来的气象观测资料表明,黄土高原地区气候存在较大的年际波动,耦合气象和土壤水分监测的研究也证明了这一地区生长季降水量的减少使得土壤储水呈减少趋势^[12],这在一定程度上加剧了土壤水分的不足。

2 植被建设对土壤干燥化的影响

植被对土壤水分的作用主要表现在两个方面:一是通过水分利用来影响土壤水分,尤其是植被生长阶段大量蒸腾耗水对不同深度土壤水分施加影响,造成土壤持续干化,二是通过植株形态和群落结构影响降水分配从而影响土壤水分的收入过程^[13-15]。植被在土壤干燥化的形成过程中起到关键作用,其中人工植被大量蒸腾耗水是土壤干燥化的直接原因。对于黄土高原来说,人工植被对土壤水分的消耗尤为严重,土壤水分含量及其季节动态均主要受植被类型的影响^[16]。此外,植被的生长年限、群落结构、冠层盖度、根系密度等都对土壤干燥化的形成有重要影响^[17,18]。

2.1 植被类型和生长年限对土壤干燥化的影响

人工植被建设改变了植被自然演替的方向,从而改变了土壤水分的演化环境。在黄土高原水土流失治理的初期,为了快速达到水土保持和改善生态环境的效果,植被恢复一般选择抗逆性和抗旱性强、速生高产的外来种和栽植种^[19]。这类植被一般耗水性强,生长阶段需要大量水分供给,而黄土高原天然降水不足,植被为

维持生长必然要通过根系不断下延吸收深层土壤水分,而深层土壤水分难以得到降水的有效补充,从而使得深层土壤干化难以恢复,对植被恢复的可持续性与生态功能的发挥形成了制约。黄土高原不同地区的研究报道显示,人工林草植被可消耗 5m、10m、甚至 20m 以下土层的水分^[20,21]。植被类型是影响土壤水分的重要因素,人工植被生产力过高、种植密度过大是形成土壤干燥化的首要原因^[3, 22-24]。研究表明,乔木、灌木、人工牧草等不同植被类型对土壤干燥化的影响差异很大,同一植被类型也因密度、生物量以及生长年限不同,对土壤干燥化的影响程度也不同^[25,26]。乔木、灌木和人工牧草植被地上部分叶片数量和生物量远高于荒草和农田,强烈的蒸腾作用使得相同条件下其土壤水分含量明显偏低,这种不同人工植被类型之间土壤水分的差异已得到广泛的证实^[27-29]。

一般而言,人工植被随着生长年限越长,地上生物量累积越多,其对土壤水分的消耗也就越高,在降水不能有效补充土壤水分的时候,土壤干燥化随着植被生长年限的增加而加剧。例如,李玉山^[30]早在 1983 年就发现多年生人工牧草地和茂密林地所形成的土壤水分亏缺,不论在深度和干燥化程度上,都远远超过一年生作物地。在黄土高原不同地区,分别针对刺槐、油松、山杏、柠条、苜蓿、沙打旺、苹果等不同植被类型时间序列的土壤水分对比分析均发现,人工乔灌木植被生长年限越长,土壤水分含量就越低^[26, 31-33]。但并不是随着植被生长年限延长,土壤水分含量呈一直减少的状态,而是在一定年限以后,土壤水分呈一个较为稳定的波动状态,并且随着人工植被的生长衰退,其对土壤水分的过度消耗也会相应减少,土壤水分会有一定的恢复。

2.2 植被群落特征与土壤干燥化的关系

相比自然植被,人工植被群落往往结构单一、密度过大、生物量较高,会消耗更多的土壤水分,加剧土壤干燥化程度^[18]。例如,李军等^[34]模拟不同种植密度刺槐林土壤干燥化效应发现,种植密度越高土壤干燥化速度越快。另外,黄土高原南部半湿润区农田在中低产年代未发现土壤干燥化现象,而在高产以后出现土壤水分不足也是一个很好的证明^[9]。王力等^[35,36]对比了子午岭天然林地和人工林地的结构特征和耗水特性,发现天然林地在结构上形成了典型的“乔—灌—草”复层稳定的空间层片结构,自我调节能力较强,只在浅层形成了轻度水分亏缺,且在雨季后能及时恢复,并未影响天然植被的发育与演替,而人工林地则形成较为严重的土壤干燥化。总体而言,当前黄土高原大规模人工植被恢复中,人工植被物种单一,群落结构简单,自我调节能力差,容易对土壤水分过度消耗,反过来土壤水分不足又影响了人工植被的生长发育,并且单一的群落结构对自然灾害、病虫害的抵御能力也相对较弱。

土壤水分及其空间变异与叶片面积、冠层盖度、叶面积指数的空间异质性密切相关^[37,38]。群落结构、叶片形态等对不同尺度的环境变化具有极强的敏感性^[39],植被系统在水分限制条件下可以通过调节植被密度、物种组成、叶片面积、叶片数目等来降低对水分需求的压力^[40],因而地表植被的覆盖度、叶面积、形态结构等功能性状及相应的水分利用过程对土壤干燥化有一个明显的反映^[41,42],这使得利用植被动态信息识别土壤干燥化过程成为可能。黄土高原浅层土壤水分时空变异方面的研究积累丰富^[43],但坡面、小流域和区域尺度上植被动态对土壤干燥化的作用还比较缺乏定量和系统的研究,这种研究上的不足还难以形成对植被合理空间布局的科学指导。尤其是当前对土壤干燥化时空格局的研究,还主要停留在野外采样—数据分析比较的阶段,由于土壤干燥化尤其是深层土壤干燥化野外采样费时费力,在一定程度上制约了相关研究的发展。虽然已经有学者开展了不同土地利用/植被格局下土壤干燥化特征的研究^[16, 28, 44-45],但仍多限于立地或坡面尺度。基于空间上的植被群落功能性状、叶面积、覆盖度等植被动态信息对土壤干燥化时空格局进行定量识别,通过植被格局优化来调整不同尺度土壤水分状况,以维持土壤水分的持续利用,亟待进一步的深入。

3 土壤和地形因素对土壤干燥化空间分异的影响

黄土高原地下水埋藏深,土壤蒸发和植物蒸腾无法利用地下水,在降雨不能满足植被消耗的情况下,植被只能消耗以悬着水状态存在的土壤储水,而这部分水分难以及时补充,人工植被若过度消耗就容易造成土壤水分的持续亏缺,而深厚的黄土覆盖是这一地区形成深层土壤干燥化的重要因素。另一方面,黄土的质地均

一,毛管孔隙发达,具有极强的蒸发能力,黄土特殊的土壤属性同样影响了土壤干燥化的形成与分布。在黄土高原,黄土粒度组成存在由东南向西北逐渐变粗的现象,从而导致在这一方向上土壤持水性能渐次降低,造成土壤蒸发性能逐渐增强^[46]。不少学者的研究表明土壤质地、容重等的差异也是黄土高原区域尺度土壤干燥化空间分异的重要影响因素,而小流域尺度的研究也同样发现,土壤类型和质地的差异影响了土壤干燥化的空间分异^[26, 47-48]。

干旱、半干旱地区土壤水分的时空分异与地形密切相关^[49,50],尤其在地形破碎、沟壑纵横的黄土丘陵区,地形是土壤水分空间变异的重要影响因素^[51,52]。地形因素中的坡度、坡向、坡位、坡形等都能通过影响水文路径、太阳辐射等作用于不同深度土壤水分^[53]。多个研究表明,植被一致的情况下,随着坡度增大,坡面径流的流速和流量增加,入渗减少,土壤含水量降低,土壤干燥化的程度就越严重^[31, 54]。阳坡受太阳辐射相对较多,土壤温度高,蒸发蒸腾作用强烈,因而土壤干燥化深度也大于阴坡^[29, 31, 55]。下坡位因径流的汇集,土壤水分含量一般高于上坡位,坡脚、沟底、川道水分条件相对较好,土壤干燥化程度小于坡顶^[19, 31]。也有研究认为地形对土壤水分的作用仅限于浅层土壤^[54],不一定能有效作用于深层土壤,深层土壤水分还主要受植被类型的影响^[56,57]。同样也有研究发现,若不考虑植被因素,土壤水分主要受地形和土壤影响,其空间格局呈现出较强的时间稳定性;但若考虑植被因素,土壤水分的空间格局并不稳定^[58]。比如,植被生长状况等作为土壤干燥化时空分异的一个重要影响因素,有时甚至能改变地形条件对土壤水分的影响^[27, 59]。

4 土壤水分的恢复与可持续利用

黄土高原的降水入渗深度除南部半湿润区在大丰水年可达到 5m 以下外,一般都在 3m 以内,且没有深层渗漏^[9, 60],黄土高原深层土壤水分的恢复较为困难。王进鑫等^[61]通过定位监测研究发现,自然条件下单纯依赖天然降水难以使人工林地土壤干燥化状况得到有效改善。也有研究发现,3 年生沙打旺草地形成的土壤干燥化至少在沙打旺铲除 3 年以后方能恢复到最初状态,而乔木形成的土壤干化在砍伐几十年后才能恢复如初^[62]。干旱、半干旱气候背景下土壤水分的恢复虽然较为困难,但合理的植被配置、整地措施以及土地管理对土壤水分的恢复也有显著作用。例如,王晗生等^[23]认为撂荒休闲、间伐或加大树木空间的人工植被管理措施,同样可以缓和郁闭林分中的缺水状况,恢复深层土壤水分。也有研究发现种植一年生农作物,土壤水分能得到一定的恢复,且恢复的深度和程度随年限的增加而增大。为维持植被生态系统的稳定和土壤水分的持续利用,当前多数研究均建议黄土高原植被建设应以自然修复为主,遵循植被演替规律和耗水规律^[46, 63],人工植被恢复需要因地制宜,依据水分承载力调控群落密度和生产力^[22, 64],并改变单一的人工植被种植方式,丰富群落结构^[17],使土壤水分得以维持和改善。梯田、水平阶、水平沟、鱼鳞坑等坡面整地措施在一定条件下可以有效拦蓄降水、增加入渗,具有改善土壤水分状况、防止和削弱土壤干燥化的作用;另一方面,坡面整地措施通过对水土进行拦蓄,还有利于提高植被成活率,促进植被生长和恢复^[65,66]。采取合理的措施与方法,干燥化的土壤能够得到一定程度的恢复,维持水分的可持续利用与生态系统的稳定。黄土高原地区大规模人工植被恢复已有几十年的时间,而生态系统演化到与环境相适应的状态往往在 60 年甚至百年以上。在探讨人工植被恢复与土壤水分的可持续利用上,也同样需要考虑在更长时间尺度上,人工植被生态系统是否最终会自我调节到与环境相适应的状态,土壤水分在更长的时间尺度上是否会同人工植被的演替达到相互适应的状态。

5 黄土高原土壤干燥化研究的问题与展望

对黄土高原土壤干燥化形成过程的研究,从最初的不同植被类型土壤水分的比较,到土壤水分的动态监测以揭示其形成过程,也有学者开始通过水分循环过程、蒸散发过程的观测,以及同位素示踪技术的应用^[67],对这一过程进行分析,从降水—土壤水的转化过程、土壤水分的消耗过程等多个方面来解析土壤干燥化过程。例如, Wang 等^[68]通过次降雨过程中湿润锋和入渗量的对比分析来研究植被类型对土壤水分收支过程的作用。

用, Fan 等^[27]和 Chen 等^[69]则结合降雨特征, 通过剖面土壤水分动态揭示了土壤干燥化的形成过程。这些研究有效推动了土壤干燥化驱动机制的研究, 但向坡面、流域或区域尺度的扩展还需要更多的案例探讨。

对土壤干燥化动态的研究表明, 浅层土壤水分受降雨、气象条件、植被耗水等影响季节波动较大, 而较深层次的土壤水分则相对较为稳定^[18, 69], 当前对小流域土壤干燥化状况及其动态的研究多以年为单位进行对比分析, 还较为缺乏空间格局及其季节动态的探讨。不同尺度土壤干燥化时空分异规律的解析, 比较多的集中于立地和坡面尺度, 侧重于不同植被类型、群落结构特征、种植年限、生物量等因素影响下的土壤水分的比较。植被随着降雨、温度等的季节变化而存在较大的季节波动, 目前还较为缺乏耦合植被群落动态特征、植被配置结构、植被空间布局对土壤干燥化时空动态影响的研究, 以明确植被动态及其空间异质性对土壤干燥化时空分异的影响。此外, 明确人工植被与土壤水分之间的互馈过程是黄土高原人工植被生态系统可持续性维持的重要基础, 而植被与土壤水文之间的互馈机制尚需要更多长期和深入的研究。

土壤干燥化是多重因素综合作用的结果, 后续研究工作需要进一步揭示多重环境因素对土壤干燥化时空动态的直接和间接影响并明确其定量关系, 构建植被与土壤水分相互作用的空间模型, 开展变化环境下不同尺度人工植被恢复对土壤水分以及生态系统影响的模拟预测研究。科学的植被配置是黄土高原水土保持和生态安全的重要基础, 对于大规模人工植被恢复区域, 需要基于植被与水分的相互作用关系, 探讨如何合理地配置植被组成和空间布局, 进行科学的植被建设以维持土壤水资源的可持续利用和生态服务功能的提升。小流域是黄土高原水土流失综合治理的基本单元, 小流域内不同植被类型的比例如何影响流域整体的土壤水分状况? 植被的空间格局及其覆盖动态是否对土壤干燥化过程产生影响? 黄土高原小流域的植被覆盖较为复杂, 从流域整体的角度研究复杂植被覆盖格局下土壤干燥化的时空分异规律, 探讨基于植被格局优化的土壤干燥化调控机制, 对于维护植被生态系统稳定和土壤安全具有重要的科学意义和应用价值。

参考文献 (References):

- [1] Legates D R, Mahmood R, Levia D F, DeLiberty T L, Quiring S M, Houser C, Nelson F E. Soil moisture: a central and unifying theme in physical geography. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2011, 35(1): 65-86.
- [2] Feng X M, Fu B J, Piao S L, Wang S, Ciais P, Zeng Z Z, Lü Y H, Zeng Y, Li Y, Jiang X H, Wu B F. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1019-1022.
- [3] Yang L, Wei W, Chen L D, Mo B R. Response of deep soil moisture to land use and afforestation in the semi-arid Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 2012, 475: 111-122.
- [4] Fu B J, Wang S, Liu Y, Liu J B, Liang W, Miao C Y. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2017, 45: 223-243.
- [5] Lü Y, Zhang L W, Feng X M, Zeng Y, Fu B J, Yao X L, Li J R, Wu B F. Recent ecological transitions in China: greening, browning, and influential factors. *Scientific Reports*, 2015, 5: 8732.
- [6] Chen H S, Shao M A, Li Y Y. Soil desiccation in the Loess Plateau of China. *Geoderma*, 2008, 143(1/2): 91-100.
- [7] Wang Y Q, Shao M A, Zhu Y J, Sun H, Fang L C. A new index to quantify dried soil layers in water-limited ecosystems: a case study on the Chinese Loess Plateau. *Geoderma*, 2018, 322: 1-11.
- [8] Chazdon R L. Beyond deforestation: restoring forests and ecosystem services on degraded lands. *Science*, 2008, 320(5882): 1458-1460.
- [9] 李玉山. 黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究. *自然资源学报*, 2001, 16(5): 427-432.
- [10] Yang L, Zhang H D, Chen L D. Identification on threshold and efficiency of rainfall replenishment to soil water in semi-arid loess hilly areas. *Science China Earth Sciences*, 2018, 61(3): 292-301.
- [11] Jia X X, Shao M A, Zhu Y J, Luo Y. Soil moisture decline due to afforestation across the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 2017, 546: 113-122.
- [12] 蒲金涌, 姚小英, 邓振镛, 张存杰, 张谋草, 王位泰. 气候变化对甘肃黄土高原土壤贮水量的影响. *土壤通报*, 2006, 37(6): 1086-1090.
- [13] Bialkowski R, Buttle J M. Stemflow and throughfall contributions to soil water recharge under trees with differing branch architectures. *Hydrological Processes*, 2015, 29(18): 4068-4082.
- [14] Jost G, Schume H, Hager H, Markart G, Kohl B. A hillslope scale comparison of tree species influence on soil moisture dynamics and runoff processes during intense rainfall. *Journal of Hydrology*, 2012, 420-421: 112-124.

- [15] Vivoni E R, Rinehart A J, Méndez-Barroso L A, Aragón C A, Bisht G, Cardenas M B, Engle E, Forman B A, Frisbee M D, Gutiérrez-Jurado H A, Hong S H, Mahmood T H, Tai K W, Wyckoff R L. Vegetation controls on soil moisture distribution in the Valles Caldera, New Mexico, during the North American monsoon. *Ecohydrology*, 2008, 1(3): 225-238.
- [16] Wang Y Q, Shao M A, Zhang C C, Han X W, Mao T X, Jia X X. Choosing an optimal land-use pattern for restoring eco-environments in a semiarid region of the Chinese Loess Plateau. *Ecological Engineering*, 2015, 74: 213-222.
- [17] Gao X D, Li H C, Zhao X N, Ma W, Wu P T. Identifying a suitable revegetation technique for soil restoration on water-limited and degraded land: considering both deep soil moisture deficit and soil organic carbon sequestration. *Geoderma*, 2018, 319: 61-69.
- [18] Yang L, Wei W, Chen L D, Chen W L, Wang J L. Response of temporal variation of soil moisture to vegetation restoration in semi-arid Loess Plateau, China. *Catena*, 2014, 115: 123-133.
- [19] 侯庆春, 韩蕊莲, 韩仕锋. 黄土高原人工林草地“土壤干层”问题初探. *中国水土保持*, 1999, (5): 11-14.
- [20] Wang Y Q, Hu W, Zhu Y J, Shao M A, Xiao S, Zhang C C. Vertical distribution and temporal stability of soil water in 21-m profiles under different land uses on the Loess Plateau in China. *Journal of Hydrology*, 2015, 527: 543-554.
- [21] Wang Z Q, Liu B Y, Liu G, Zhang Y X. Soil water depletion depth by planted vegetation on the Loess Plateau. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, 52(6): 835-842.
- [22] 杨维西. 试论我国北方地区人工植被的土壤干化问题. *林业科学*, 1996, 32(1): 78-85.
- [23] 王哈生. 植被作用下土壤干化的反馈效应及相关问题讨论. *地理科学进展*, 2007, 26(6): 33-39.
- [24] 王力, 邵明安, 李裕元. 陕北黄土高原人工刺槐林生长与土壤干化的关系研究. *林业科学*, 2004, 40(1): 84-91.
- [25] Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P. Vertical distribution and influencing factors of soil water content within 21-m profile on the Chinese Loess Plateau. *Geoderma*, 2013, 193-194: 300-310.
- [26] Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P, Warrington D N. Regional spatial pattern of deep soil water content and its influencing factors. *Hydrological Sciences Journal*, 2012, 57(2): 265-281.
- [27] Fan J, Wang Q J, Jones S B, Shao M A. Soil water depletion and recharge under different land cover in China's Loess Plateau. *Ecohydrology*, 2016, 9(3): 396-406.
- [28] Zhao Y L, Wang Y Q, Wang L, Zhang X Y, Yu Y L, Jin Z, Lin H, Chen Y P, Zhou W J, An Z S. Exploring the role of land restoration in the spatial patterns of deep soil water at watershed scales. *Catena*, 2019, 172: 387-396.
- [29] Wang L, Wei S, Horton R, Shao M A. Effects of vegetation and slope aspect on water budget in the hill and gully region of the Loess Plateau of China. *Catena*, 2011, 87(1): 90-100.
- [30] 李玉山. 黄土区土壤水分循环特征及其对陆地水分循环的影响. *生态学报*, 1983, 3(2): 91-101.
- [31] 何福红, 黄明斌, 党廷辉. 黄土高原沟壑区小流域土壤干层的分布特征. *自然资源学报*, 2003, 18(1): 30-36.
- [32] 万素梅, 贾志宽, 韩清芳, 杨宝平. 黄土高原半湿润区苜蓿草地土壤干层形成及水分恢复. *生态学报*, 2008, 28(3): 1045-1051.
- [33] Zhao C L, Jia X X, Zhu Y J, Shao M A. Long-term temporal variations of soil water content under different vegetation types in the Loess Plateau, China. *Catena*, 2017, 158: 55-62.
- [34] 李军, 王学春, 邵明安, 赵玉娟, 李小芳. 黄土高原不同密度刺槐(*Robinia pseudoacacia*)林地水分生产力与土壤干燥化效应模拟. *生态学报*, 2008, 28(7): 3125-3142.
- [35] 王力, 邵明安, 王全久, 贾志宽. 黄土高原子午岭天然林与刺槐人工林地土壤干化状况对比. *西北植物学报*, 2005, 25(7): 1279-1286.
- [36] Wang L, Wang Q J, Wei S P, Shao M A, Li Y. Soil desiccation for loess soils on natural and regrown areas. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(7): 2467-2477.
- [37] Zhang Y, Huang M B, Lian J J. Spatial distributions of optimal plant coverage for the dominant tree and shrub species along a precipitation gradient on the central Loess Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 206: 69-84.
- [38] He L L, Ivanov V Y, Bohrer G, Maurer K D, Vogel C S, Moghaddam M. Effects of fine-scale soil moisture and canopy heterogeneity on energy and water fluxes in a northern temperate mixed forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 184: 243-256.
- [39] 李永华, 卢琦, 吴波, 朱雅娟, 刘殿君, 张金鑫, 靳占虎. 干旱区叶片形态特征与植物响应和适应的关系. *植物生态学报*, 2012, 36(1): 88-98.
- [40] 李小雁. 干旱地区土壤-植被-水文耦合、响应与适应机制. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41(12): 1721-1730.
- [41] Caylor K K, Scanlon T M, Rodriguez-Iturbe I. Feasible optimality of vegetation patterns in river basins. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(13): L13502.
- [42] Ferreira J N, Bustamante M, Garcia-Montiel D C, Caylor K K, Davidson E A. Spatial variation in vegetation structure coupled to plant available water determined by two-dimensional soil resistivity profiling in a Brazilian savanna. *Oecologia*, 2007, 153(2): 417-430.
- [43] 邵明安, 贾小旭, 王云强, 朱元骏. 黄土高原土壤干层研究进展与展望. *地球科学进展*, 2016, 31(1): 14-22.

- [44] 张晨成, 邵明安, 王云强. 黄土区坡面尺度不同植被类型下土壤干层的空间分布. 农业工程学报, 2012, 28(17): 102-108.
- [45] 姚雪玲, 傅伯杰, 吕一河. 黄土丘陵沟壑区坡面尺度土壤水分空间变异及影响因子. 生态学报, 2012, 32(16): 4961-4968.
- [46] 杨文治, 田均良. 黄土高原土壤干燥化问题探源. 土壤学报, 2004, 41(1): 1-6.
- [47] Zhao Y L, Wang Y Q, Wang L, Fu Z H, Zhang X Y, Cui B L. Soil-water storage to a depth of 5 m along a 500-km transect on the Chinese Loess Plateau. *Catena*, 2017, 150: 71-78.
- [48] Wu Y Z, Huang M B, Warrington D N. Black Locust Transpiration responses to soil water availability as affected by meteorological factors and soil texture. *Pedosphere*, 2015, 25(1): 57-71.
- [49] Western A W, Grayson R B, Blöschl G, Willgoose G R, McMahon T A. Observed spatial organization of soil moisture and its relation to terrain indices. *Water Resources Research*, 1999, 35(3): 797-810.
- [50] Chaney N W, Joshua K R, Herrera-Estrada J E, Wood E F. High-resolution modeling of the spatial heterogeneity of soil moisture: applications in network design. *Water Resources Research*, 2015, 51(1): 619-638.
- [51] Hu W, Si B C. Revealing the relative influence of soil and topographic properties on soil water content distribution at the watershed scale in two sites. *Journal of Hydrology*, 2014, 516: 107-118.
- [52] Qiu Y, Fu B J, Wang J, Chen L D. Soil moisture variation in relation to topography and land use in a hillslope catchment of the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 2001, 240(3/4): 243-263.
- [53] Duan L X, Huang M B, Zhang L D. Differences in hydrological responses for different vegetation types on a steep slope on the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 2016, 537: 356-366.
- [54] Yang L, Wei W, Chen L, Jia F, Mo B. Spatial variations of shallow and deep soil moisture in the semi-arid Loess Plateau, China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(9): 3199-3217.
- [55] 王力, 邵明安, 侯庆春, 杨岗民. 延安试区人工刺槐林地的土壤干层分析. 西北植物学报, 2001, 21(1): 101-106.
- [56] Mei X M, Zhu Q K, Ma L, Zhang D, Liu H F, Xue M J. The spatial variability of soil water storage and its controlling factors during dry and wet periods on loess hillslopes. *Catena*, 2018, 162: 333-344.
- [57] Mei X M, Ma L, Zhu Q K, Li B, Zhang D, Liu H F, Zhang Q N, Gou Q P, Shen M S. The variability in soil water storage on the loess hillslopes in China and its estimation. *Catena*, 2019, 172: 807-818.
- [58] Gómez-Plaza A, Alvarez-Rogel J, Albaladejo J, Castillo V M. Spatial patterns and temporal stability of soil moisture across a range of scales in a semi-arid environment. *Hydrological Processes*, 2000, 14(7): 1261-1277.
- [59] Yang L, Chen L D, Wei W. Effects of vegetation restoration on the spatial distribution of soil moisture at the hillslope scale in semi-arid regions. *Catena*, 2015, 124: 138-146.
- [60] 杨新民, 杨文治. 干旱地区人工林地土壤水分平衡的探讨. 水土保持通报, 1988, 8(3): 32-38.
- [61] 王进鑫, 黄宝龙, 罗伟祥. 黄土高原人工林地水分亏缺的补偿与恢复特征. 生态学报, 2004, 24(11): 2395-2401.
- [62] 景可, 申元村. 黄土高原水土保持对未来地表水资源影响研究. 中国水土保持, 2002, (1): 12-14.
- [63] An W M, Li Z S, Wang S, Wu X, Lv Y H, Liu G H, Fu B J. Exploring the effects of the "Grain for Green" program on the differences in soil water in the semi-arid Loess Plateau of China. *Ecological Engineering*, 2017, 107: 144-151.
- [64] 郭忠升, 邵明安. 半干旱区人工林草地土壤旱化与土壤水分植被承载力. 生态学报, 2003, 23(8): 1640-1647.
- [65] Wei W, Chen L D, Yang L, Samadani F F, Sun G. Microtopography recreation benefits ecosystem restoration. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(20): 10875-10876.
- [66] Wei W, Feng X R, Yang L, Chen L D, Feng T J, Chen D. The effects of terracing and vegetation on soil moisture retention in a dry hilly catchment in China. *Science of the Total Environment*, 2019, 647: 1323-1332.
- [67] Li Z, Chen X, Liu W Z, Si B C. Determination of groundwater recharge mechanism in the deep loessial unsaturated zone by environmental tracers. *Science of the Total Environment*, 2017, 586: 827-835.
- [68] Wang S, Fu B J, Gao G Y, Liu Y, Zhou J. Responses of soil moisture in different land cover types to rainfall events in a re-vegetation catchment area of the Loess Plateau, China. *Catena*, 2013, 101: 122-128.
- [69] Chen H S, Shao M A, Li Y Y. The characteristics of soil water cycle and water balance on steep grassland under natural and simulated rainfall conditions in the Loess Plateau of China. *Journal of Hydrology*, 2008, 360(1/4): 242-251.