

# 黄土高原林草地覆盖土壤水量平衡研究进展

李海防<sup>1,2</sup>, 卫伟<sup>1</sup>, 陈利顶<sup>1</sup>, 郭二辉<sup>1</sup>, 黄勇<sup>3</sup>

(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 100086;

2. 桂林理工大学 旅游学院, 广西 桂林 541004; 3. 环境保护部 环境工程评估中心, 北京 100012)

**摘 要:**黄土高原地处干旱半干旱区,水是地区生态环境改善的主要限制因子,严重阻碍了当地的植被恢复和生态重建。黄土高原林草地覆盖土壤蓄水量既有收入,又有支出,始终处于一种动态平衡但相对亏缺的状态。以黄土高原降雨时空变化、林草地土壤水分入渗、土壤水分蒸发蒸腾、土壤干层的形成以及水量平衡模型模拟等几个关键因素为切入点进行详细阐述,对其国内外研究进展进行回顾。提出关于黄土高原土壤水量平衡的研究,应在成熟林草地水源涵养功能及林草地水文生态过程的尺度扩展方面加大力度。

**关键词:**土壤水量平衡; 林草地覆盖; 研究进展; 黄土高原

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2013)01-0287-07

## Progress in the Study of Soil Water Balance under Forest and Grassland Covers on the Loess Plateau

LI Hai-fang<sup>1,2</sup>, WEI Wei<sup>1</sup>, CHEN Li-ding<sup>1</sup>, GUO Er-hui<sup>1</sup>, HUANG Yong<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Science,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100086, China; 2. College of Tourism, Guilin University of Technology, Guangxi, Guilin 541004, China; 3. Assessment Center of Environmental Engineering, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100012, China)

**Abstract:** Most parts of the Loess Plateau were located in arid and semi-arid areas, and soil water was a crucial factor influencing vegetation restoration and eco-environmental reconstruction. Water was transferred continuously between soil, vegetation and atmosphere and kept in a dynamic balance in the soil. Former studies in relation to specific fields such as the spatial and temporal variation of precipitation, water infiltration, evapotranspiration, dried soil layer and modeling on soil water balance under forest and grassland covers were summarized and analyzed systematically. In addition, we suggested that research should focus on the counterbalancing function of water holding capability of vegetation and eco-hydrological process and its scaling up in forest and grass land.

**Key words:** soil water balance; forest and grass land; research progress; Loess Plateau

在黄土高原,水资源是影响当地生态环境改善的主要制约因子。黄土高原土层深厚,结构疏松,持水能力强,是巨大的天然蓄水库<sup>[1]</sup>。土壤储水既有收入,也有支出,处于动态平衡状态。收入项主要以大气降雨为主,部分地区和地段还包括少量地下水补给和凝结水;支出项包括植被蒸散耗水、冠层截留、水分渗漏、地表和地下径流等;水量收入和支出的差值反映了土壤储水量的变化<sup>[2]</sup>。目前,黄土高原林草地总

面积约 8.78 万 km<sup>2</sup><sup>[3-4]</sup>,近十几年来,通过“退耕还林还草”工程措施的实施,黄土高原林草地面积有一定程度的提高,但由于不同植被类型和植被条件下,土壤性质及土壤水分的利用状况不同,从而影响土壤水分循环,进而又对地上植被的生长产生重要影响<sup>[5-6]</sup>。大面积恢复林草地改变了土壤的水量平衡,导致土壤干层扩张<sup>[3,7]</sup>及“小老树”现象的产生<sup>[8]</sup>。因而,研究黄土高原林草地土壤水量平衡,对指导地方林业生态

收稿日期: 2012-02-19

修回日期: 2012-07-20

资助项目: 国家杰出青年科学基金“景观地理学”(40925003); 国家青年科学基金“黄土小流域水蚀过程对降雨和土地利用格局演变的响应机制”(40801041)

作者简介: 李海防(1974—),男,山东莱阳人,博士,副教授,主要从事生态学及景观生态学教学与科研工作。E-mail: lihaifang@scib.ac.cn

通信作者: 陈利顶(1965—),男,河南辉县人,博士,研究员,主要从事景观格局与生态过程、土地利用变化的环境效应与区域生态安全方面的研究。E-mail: liding@rcees.ac.cn

建设,改善地区生态环境,具有重要的理论和实践意义<sup>[2]</sup>。

## 1 黄土高原土壤水分入渗

### 1.1 降雨时空变化

降雨是黄土高原土壤水分的唯一来源,其分布具有明显的时空分异性。从大的空间范围看,黄土高原降雨量从东南向西北方向逐渐减少,年平均降雨量从东南部的 550 mm 递减到西北部的不足 200 mm<sup>[4]</sup>。黄土高原大部分降雨集中于夏季 7—9 月份,约占全年总降雨量的 50%~80%。同时,黄土高原年均降雨量在最近几年呈现出逐年减少的趋势<sup>[9-10]</sup>。

### 1.2 林草地土壤水分入渗过程

黄土高原大部分地区属壤质土壤,土层深厚,除因雨强、坡度等因素造成超渗产流外,大部分降雨可以渗入土中,成为土壤水<sup>[3]</sup>。有关黄土高原土壤水分入渗过程,国内外学者在不同立地条件下进行了大量研究。刘贤赵等<sup>[11]</sup>研究黄土高原沟壑区土壤入渗过程认为,土壤积水入渗过程中,土壤含水量一般经过“稳定不变、缓慢上升、急剧上升和再稳定”4 个阶段;不同土地利用类型各阶段经历的时间长短不同,积水越深,土壤含水率、入渗变化越明显,湿润锋推移的速度越快。一般认为,土壤初始含水率直接影响着雨后土壤水分入渗。Bodman 和 Colinan<sup>[12]</sup>认为,在入渗初期,随着土壤初始含水率的增加,土壤入渗速率逐渐减少;随着时间的延续,土壤水分趋于饱和,含水率对入渗的影响也逐渐变小,最终可以忽略。解文艳和樊贵盛<sup>[13]</sup>也认为,土壤入渗量随土壤含水量的增加而减小;影响土壤渗透性的因子首先是非毛管孔隙度,其次是坡度和水稳性团聚体,而与土壤容重和总孔隙度相关性很小<sup>[6,14]</sup>。在降雨动力推动下,一部分雨水可以下渗到一定土层范围内<sup>[15]</sup>,另一部分雨水尽管有重力推动,但往往由于上层土壤很难达到水分饱和状态,雨水很难进一步向深层土壤入渗<sup>[3]</sup>。李玉山等<sup>[16]</sup>的研究也指出,降雨对黄土高原土壤水分的影响一般可以达到 200 cm 以下,在大雨条件下可以达到 500 cm。

### 1.3 地上植被与土壤水分入渗的关系

关于地上植被与水分入渗的关系,余新晓等<sup>[17]</sup>对不同盖度的油松林进行研究发现,林分盖度越高,土壤入渗性能越好,水土保持效益越显著;地表植被覆盖越低,地表径流越大;减少草地增加林地,能有效降低地表径流。李斌兵等<sup>[18]</sup>、潘成忠和上官周平<sup>[19]</sup>研究了坡耕地、草地和林地的降雨入渗率发现,不同植被的入渗率排序一般为:林地>草地>坡耕地。韩

冰等<sup>[20]</sup>也发现,油松林的初渗率、平均入渗速率和稳渗率均显著高于荒坡地,具有较强的入渗能力。刘贤赵等<sup>[21]</sup>也得出类似的结论,林地土壤稳渗率是农地的 2.7 倍;初渗率是撂荒地的 3.3 倍。林草地对土壤物理性质的影响主要表现在植被能有效地改善 0—20 cm 层的土壤结构。与荒坡地相比,林草地土壤表层容重较小,有效地改善了表层土壤的结构<sup>[22]</sup>。林地地表积累大量枯枝落叶,这些凋落物的分解,增加了土壤有机质的含量,使土壤容重降低、孔隙度增大,增加了土壤的入渗能力。农田与荒草地的土壤特性相似,但苜蓿地情况较为特殊,由于苜蓿具有强大的根系,其地表土壤特性与林地相似,就整个土壤剖面而言,土壤容重大小次序为:苜蓿地>林地>农田>荒草地<sup>[23]</sup>。人工林可以通过增加土壤入渗减少地表径流量,张晓明等<sup>[24]</sup>研究认为,通过扩大林草地,治理流域比未治理流域在丰水年、平水年和枯水年的径流系数分别减少 50%、85%和 90%。刘昌明等<sup>[25]</sup>指出,黄土高原林区的年径流深显著低于非林区,林区的径流系数较非林区小 40%~60%,非林区的年径流量为林区的 1.7~3.0 倍。但 Chen 等<sup>[26]</sup>发现,由于地表坚实度较高和缺少地表覆盖物,相对农田和草地,林地的地表径流量较大。草地也能够明显改善土壤的渗透性能,在干旱半干旱地区,大力种植草本植物,能起到增加入渗改善地表径流的作用,如在黄土半干旱区陡坡地通过林草混交,可提高植被覆盖度和林下植被生物量,大大降低地表径流<sup>[17]</sup>。就混交林和纯林而言,陈杰等<sup>[27]</sup>认为,混交林的土壤容重均略小于纯林,这主要是由于混交林密度较大,活地被物及根系较多,对表层土壤起到一定的疏松作用,土壤容重降低,孔隙度增大,但其改良作用十分有限。总之,水分进入土壤的过程是一个复杂的水文过程,它与枯落物覆盖、根系分布、表土结构、土壤容重、湿度、坡向和坡位等多种因素有关<sup>[20]</sup>。例如,李斌兵和郑粉莉<sup>[18]</sup>研究认为,林地的入渗率对土壤饱和导水率变化比较敏感,草地的入渗率对土壤初始含水率变化比较敏感。

## 2 黄土高原土壤水分蒸散发

### 2.1 裸地土壤水分的蒸发

黄土高原土壤水分蒸散发是指一定时间内植物蒸腾量与土壤蒸发量之和,是土壤水分的主要支出项。尤其是当土壤侧渗和地表径流很少发生时,蒸散发就成为土壤水分最主要的支出方式<sup>[14]</sup>。Chen 等<sup>[15]</sup>研究认为,地表蒸散可以消耗掉土壤入渗的大部分水分,即使在降雨较多的年份也可以消耗掉土壤

超过80%的水分。当地表没有植被而处于裸露状态时,土壤水分的主要支出项则为土壤蒸发。黄土高原降水量少,地表蒸发量大,年蒸发量可达800~1 000 mm<sup>[2]</sup>。目前,有关黄土高原裸地土壤水分蒸发的研究较少。一般认为,裸地土壤水分蒸发较大,土壤水分有效性比有植被覆盖的低<sup>[28]</sup>。黄土高原土壤持水性与含中、轻和沙壤土的质地有关,但不受重黏土的影响<sup>[29]</sup>。

## 2.2 林草地土壤水分的蒸腾

蒸腾作用是植物消耗水分的主要途径,由于植物种类的不同以及地区间的差异,不同植被土壤水分的亏缺量不同,但总体上林地和草地土壤水分的蒸腾量较高<sup>[14]</sup>。胡梦珩等<sup>[2]</sup>对幼龄刺槐林的研究表明,在降水量为416.2 mm的情况下,长在阴坡的刺槐林年总耗水量为685.6 mm,长在阳坡的刺槐林年总耗水量达752 mm。杨海军等<sup>[30]</sup>研究晋西水土保持林地土壤的水量平衡认为,刺槐、油松等乔木林的蒸散量超过同期降水量,易发生土壤干旱;沙棘、虎榛子等灌木林发生干旱的危险性次之,草地与裸地的危险性最小。王进鑫等<sup>[31]</sup>对黄土高原丘陵区刺槐、侧柏和油松林地土壤水分的研究结果表明,由于植被的蒸腾作用,0—40 cm层的土壤水分亏缺最大,刺槐、侧柏和油松分别为72.22~75.36 mm、62.70~65.82 mm和69.56~71.08 mm。张建军等<sup>[32]</sup>研究人工林和次生林土壤蓄水量,结果表明:0—150 cm土层中次生林地蓄水量是人工林地的114倍,刺槐与油松人工林地的耗水量明显大于次生林。

关于草地土壤水分的蒸腾,李玲芬等<sup>[33]</sup>在研究草地的土壤水分动态时发现,土壤水分含量与植物耗水密切相关;多年生植被生长期长,根系分布深,年蒸发蒸腾量大于一年生植被。Zhao等<sup>[34]</sup>研究了渭北人工草地的水量平衡,结果表明,紫花苜蓿人工草地的蒸散量很大,即使在丰水年也能消耗深层的土壤储水,处在生长发育期的紫花苜蓿年耗水量高达800~1 000 mm,为年降水量的1.4~1.7倍;3 a生大叶苜蓿在年降水量为255.8 mm的情况下,其年蒸腾量达312.6 mm。在同样的气候、地形与土壤条件下,多年生自然牧草地的蒸发量和蒸腾量在植物旺盛生长期,也明显大于年降水量<sup>[35]</sup>。与林地内的土壤水分相比,草地土壤含水量要明显偏高,且随深度增加呈增加趋势,而林地则正好相反<sup>[33]</sup>。

## 2.3 地上植被和土壤水分蒸散的关系

在黄土高原地区,植被对土壤水分含量有双重影响。一方面,林草植被的拦蓄降水、截留地表径流等功能以及植被对地表的直接或间接覆盖,能减小裸地

蒸发;林草地的水文功能主要表现在树冠截留、树干滞流、林下植被及枯枝落叶层滞流和增加土壤入渗<sup>[36]</sup>。另一方面,植被的蒸腾作用会加强土壤水分向空气中散失。大量资料表明,黄土高原林草地土壤水量支出往往大于收入,土壤水分严重亏缺,致使后期植被生长缓慢乃至衰败枯死,土壤水分是影响地上植被的最重要的环境因子<sup>[37]</sup>。因而,黄土高原植被和土壤水分蒸散的关系研究,关系到生态环境和植被群落的可持续发展<sup>[1]</sup>。

植被耗水量与树种构成、年龄大小及生物量密切相关,不同的植被类型,高生长量的人工牧草和木本植物,根系发达,耗水量大。不同林型的植被耗水量一般为乔木林>灌木林>草地>裸地<sup>[38-40]</sup>。不同的土地利用方式土壤水分含量一般为:农田>荒草地>林地>苜蓿地<sup>[23]</sup>,其土壤水分的季节变化趋势一致,但苜蓿地和林地土壤水分含量的季节变化较农田和荒草地更为剧烈。就林地而言,不同植被类型的生理耗水量不同,土壤水分亏缺程度不同,亏缺次序为:柠条>刺槐>苜蓿>侧柏>杨树>油松>荒坡>杏>枣>农地<sup>[41]</sup>。李军等<sup>[42]</sup>对黄土高原53类林地、草地和农田深层土壤湿度的观测结果表明:林地、草地和农田土壤水分过耗量平均值分别为521,491,30 mm,林地、草地和农田土壤干燥化指数平均值分别为39%,42%和96%。从草地到林地,土壤可补给水量减少了25%~45%<sup>[43-44]</sup>,根系越深,土壤水分蒸散越多<sup>[45-46]</sup>。Wang等<sup>[47]</sup>研究发现,苜蓿、柠条和油松分别可以吸收地下15.5,22.4,21.5 m深的水分。农田土壤失水层可达地下500 cm,而果园和草地分别为940 cm和800~1 000 cm<sup>[48]</sup>。樊军等<sup>[49]</sup>研究发现,陕西省长武县15 a生的苹果园和15 a生的紫花苜蓿地,土壤干层比10 a生的苹果园和7 a生的刺槐林地要深。邵薇薇等<sup>[50]</sup>以黄土高原51个小流域为研究地点,分析植被指数(NDVI)与水分蒸散的关系。结果表明:在降水量较多的地区,植被密度越大,实际蒸散发量也越多。但有研究发现:林地的生物量与总耗水量相关性不显著,而与林分蒸腾耗水显著相关。例如,紫花苜蓿由于其根系强大,具有很强的水分蒸腾能力<sup>[51]</sup>。也有研究证实,不同林地类型总耗水量接近,而蒸腾耗水量差别较大;相同地点、同种植被条件,不同生物量的林分蒸腾耗水量差别为69~365 mm,而蒸散耗水为1~400 mm;凡是蒸腾耗水量少的林分,其蒸散耗水量必定较大<sup>[52-53]</sup>。叶面积指数是影响黄土高原植被蒸腾的主要因子<sup>[54-56]</sup>。25 a果龄的果园100—400 cm土层土壤含水量明显低于15 a果龄果园<sup>[57]</sup>。植被由低级阶段向高级阶段演替

过程是“土壤水库”的耗水过程<sup>[58]</sup>。此外,土壤水分的蒸散还受降雨量、气温、湿度等因素的影响,耗水量也有很大差别。

### 3 黄土高原土壤干层

#### 3.1 黄土高原土壤干层的形成

土壤干层是指位于降雨入渗补给深度以下,因植被蒸散导致土壤水分负平衡而形成的干土层。它具有以下主要特征:(1)位于土体某一深度范围内,一般在降水入渗深度以下;(2)具有相对持久性,不会因为土地利用类型的改变和降雨的入渗而消失;(3)具有一定的湿度范围,下限为凋萎湿度,上限为毛管断裂湿度或土壤稳定湿度<sup>[47]</sup>;(4)干层深度与植物根系分布相对应,根系越长,干层越深;(5)干燥强度因植物种类和生长年限而定,并与降水量和蒸散量的比值相关<sup>[59]</sup>。一般认为,“低降水、高蒸发”的气候环境是黄土高原土壤干层形成的主要原因<sup>[60]</sup>。近50 a来,黄土高原地区气候变暖和降雨减少可能是土壤干层形成的直接原因,而植被类型选择不当、群落密度过大和生产力过高则会加剧深层土壤的干燥化进程<sup>[61]</sup>,有植被的土壤干层要比裸地严重的多<sup>[7,15]</sup>。

#### 3.2 地上植被特征与土壤干层的关系

大量研究表明,黄土高原现有的天然林、灌木林和果林普遍存在着土壤干层<sup>[62]</sup>。研究表明,刺槐、白榆、油松是黄土高原干旱、半干旱区的主要人工林类型,林分密度普遍偏高,容易出现土壤干化现象<sup>[63]</sup>。也有研究认为,干化层的形成主要受区域本身的土壤、地理、气候等因素影响,而非林木生长的结果<sup>[64]</sup>。但综合前人的研究,地上植被与土壤干层的形成是显著相关的。杜鹃等<sup>[65]</sup>研究发现,杨树林、法国梧桐林和中国梧桐林下1.5~4 m土层发育了弱的土壤干化层,而麦地和草地下0~6 m水分状况良好,未出现干层现象。万素梅等<sup>[66]</sup>发现生长年限低于8 a的苜蓿草地出现轻度干层,生长年限超过8 a,出现中度干层,苜蓿生长18 a后,深层土壤通体干化。黄土高原典型植被土壤干层厚度表现为:油松、辽东栎、狼牙刺和柠条林地>刺槐林地>苹果和沙棘林地<sup>[42,67]</sup>。Wang等研究确定苜蓿、柠条和油松林植被下的耗水深度分别达到15.5,22.4,21.5 m。人工林地和草地由于耗水量大,且具有多年连续性,往往是年耗水量大于年降水量;由于没有足够的降雨补充,深层土壤长时间水分亏缺,即使在丰水年也不可能得到完全恢复,长此累积则会形成永久性干层,且随年限增加,干层厚度逐渐加大<sup>[68]</sup>,并在短时间内难以改善<sup>[46]</sup>。此外,土壤干层并不完全是人工植被的产物,天然林地

和天然草地同样有土壤干层现象发生<sup>[60]</sup>。天然荒草地土壤水分循环强度大于裸地,表现为荒草地蒸腾作用层深度较大,二者分别为200 cm和180 cm。在相同的降雨量条件下,荒草地土壤水分循环强度高于裸地,表现为荒草地降雨入渗补给深度较小<sup>[69]</sup>。此外,土壤干层的发育还受地形、坡向、坡度和轮作方式等因素的影响。一般认为,阳坡形成的干层较阴坡严重;坡度愈大,土壤干化愈剧烈<sup>[70]</sup>。与连作苜蓿相比,轮作苜蓿不会大量消耗土壤深层水分而形成深厚的土壤干层,有利于土壤水分的可持续利用<sup>[71]</sup>。针阔叶植被配置模式土壤水分状况要稍好于阔叶纯林的配置模式<sup>[67]</sup>。

### 4 黄土高原水量平衡模拟

研究黄土高原植物与土壤水分之间的动态平衡关系,对于建立稳定的植被生态系统,实现生态系统的高效可持续运行,具有重要作用<sup>[72]</sup>。为解释土壤干层的形成机理,围绕黄土高原水循环动态过程,国内外研究者开展了大量的建模尝试和分析。其中,SWAP、CoupModel、WAVES等水量平衡模型应用较多。但这些模型中,有些模型需要大量的参数,应用起来比较复杂;有些模型则比较简单,对水量平衡动态的描述又有欠缺<sup>[73]</sup>。黄土高原较为简单的水量平衡模型为:

$$P=E+T+D+R+\Delta S+E_i$$

式中: $P$ ——降雨量; $E$ ——地表蒸发; $T$ ——植被蒸腾; $R$ ——地表径流; $D$ ——水分渗漏; $\Delta S$ ——土壤储水量; $E_i$ ——林冠穿透雨蒸发。一般情况下,地表径流和林冠穿透雨蒸发量较少,水量平衡模型可简写为: $P-\Delta S=E+T+D$ <sup>[74]</sup>。在黄土高原丘陵沟壑区,陈洪松等<sup>[69]</sup>(2005)提出简化的坡面土壤水平衡模型为:

$$\Delta W=P_a-P_s-I-E$$

$$P_a=P\cos\alpha\sin\beta$$

式中: $\Delta W$ ——观测期始末土壤储水量的差值(mm); $P_a$ ——坡面承雨量(mm); $P_s$ ——地表径流量(mm); $I$ ——冠层截留量(mm); $E$ ——蒸散(发)量(mm); $P$ ——降落在平坦地面上的雨量(mm); $\alpha$ ——地面坡度(°); $\beta$ ——雨点着地轨迹线与水平面的夹角(°)。余冬立等<sup>[35]</sup>利用土壤—水—大气—植物耦合模型(Soil—Water—Atmosphere—Plant, SWAP)模拟黄土高原水蚀风蚀交错区林草地SPAC系统水分传输过程,揭示了坡面典型植被SPAC系统水量平衡状况。SWAP模型则主要用于模拟土壤—植物—大气传输系统中水分运动、溶质运移、热量传输及作物生

长过程<sup>[75]</sup>;CoupModel 模型也经常被应用于水量平衡模拟<sup>[76-77]</sup>,该模型是一维模型,遵循质量守恒定律,由水势梯度和温度梯度作为土壤水运动的驱动力,在此基础上模拟了饱和与非饱和条件下水分的传导机制,以及 SPAC 系统包括地表径流、水分蒸散、土壤表面的辐射吸收平衡、水分入渗、碳氮循环等生态过程<sup>[78]</sup>;该模型同时融合了 SOIL<sup>[79]</sup>和 SOIL—N<sup>[80]</sup>两个模型。WAVES 模型用四大模块来模拟能量、降雨入渗、径流、植物根系水分吸收、水分再分配、地下水和碳循环等生态过程,冠层蒸散量和土壤蒸发用 Penman-Monteith 公式计算,动力阻力根据 Monm-Obukhov 的相似理论来确定,冠层阻力利用 Ball 和 Leuning 模型来确定。而 Huang 等<sup>[73]</sup>则用改进的 WAVES 模型对黄土高原不同降雨条件下降雨、植被、水量平衡之间的联系进行动态模拟。

## 5 研究展望

如何解决黄土高原干旱缺水这一难题,是实现当地生态健康和区域人地关系协调发展的根本。自 1999 年国家实施“退耕还林还草”工程以来,黄土高原进行了大面积的植树种草,生态环境建设取得了一定成效。但同时,大面积植树种草不可避免地对土壤水量平衡产生了重要影响,引起科学界的普遍关注。本文系统回顾了国内外主要的相关研究与进展,认为未来有关黄土高原水量平衡方面的研究应该在以下两个方面进行深入研究。

第一,加大黄土高原林草地水源涵养功能研究力度。目前,很多有关水量平衡的研究多集中于考虑植被的蒸腾蒸散对土壤水量平衡的影响,而没有考虑林草地自身的水源涵养功能,特别是成熟林草地的水源涵养功能对土壤水分蒸散的抵消作用。

第二,林草地生态水文过程的尺度扩展。从已有的研究来看,林草地生态正向效应大于其生态负向效应,但这个结论是在研究小区域生态水文效应基础上得出的,因此,有必要从大时空尺度研究地表植被对土壤干层的影响,为研究黄土高原土壤水量平衡提供新的内容。

### 参考文献:

- [1] 孙宝胜,杨开宝,拓文俊. 黄土高原丘陵沟壑区土壤水资源平衡利用与生态植被可持续发展[J]. 西北农业学报, 2005,14(4):92-96.
- [2] 胡梦珩,刘文兆,赵姚阳. 黄土高原农、林、草地水量平衡异同比较分析[J]. 干旱地区农业研究,2003,21(4):113-116.
- [3] Shangguan Z P, Zheng S X. Ecological properties of soil water and effects on forest vegetation in the Loess Plateau[J]. International Journal of Sustainable Development and World Ecology,2006,13(4):307-314.
- [4] 何永涛,李文华,郎海鸥. 黄土高原降水资源特征与林木适宜度研究[J]. 干旱区研究,2009,26(3):407-412.
- [5] Priha O, Lehto T, Smolander A. Mycorrhizas and C and N transformations in the rhizospheres of Pinus sylvestris, Picea abies and Betula pendula seedlings[J]. Plant and Soil,1999,206(2):191-204.
- [6] Cao S X, Chen L, Xu C G, et al. Impact of three soil types on afforestation in China's Loess Plateau: growth and survival of six tree species and their effects on soil properties[J]. Landscape and Urban Planning,2007,83(2/3):208-217.
- [7] Chen H S, Shao M A, Li Y Y. Soil desiccation in the Loess Plateau of China[J]. Geoderma,2008,143(1/2):91-100.
- [8] 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[J]. 中国水土保持,1999(5):11-14.
- [9] Tao F, Yokozawa M, Xu Y, et al. Climate changes and trends in phenology and yields of field crops in China, 1981—2000[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2006,138(1/4):82-92.
- [10] Yang Y, Feng Z, Huang H Q, et al. Climate-induced changes in crop water balance during 1960—2001 in Northwest China [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment,2008,127(1/2):107-118.
- [11] 刘贤赵,康绍忠. 黄土高原沟壑区小流域土壤入渗分布规律的研究[J]. 吉林林学院学报,1997,13(4):203-208.
- [12] Bodman G B, Colinan E A. Moisture and energy condition during down ward entry of water into soil[J]. Soil Science,1994,8(2):166-182.
- [13] 解文艳,樊贵盛. 土壤含水量对土壤入渗能力的影响[J]. 太原理工大学学报,2004,35(3):272-275.
- [14] 李庆云,余新晓,信忠保,等. 黄土高原典型流域不同土地利用类型土壤物理性质分析[J]. 水土保持研究, 2010,17(6):106-114.
- [15] 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 [J]. Journal of Hydrology, 2008,360(1/4):242-251.
- [16] 李玉山. 苜蓿生产力动态及其水分生态环境效应[J]. 土壤学报,2002,39(3):404-411.
- [17] 余新晓,张晓明,武思宏,等. 黄土区林草植被与降水对坡面径流和侵蚀产沙的影响[J]. 山地学报,2006,24(1):19-26.
- [18] 李斌兵,郑粉莉. 黄土坡面不同土地利用下的降雨入渗

- 模拟与数值计算[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(5): 118-223.
- [19] 潘成忠, 上官周平. 黄土区次降雨条件下林地径流和侵蚀产沙形成机制: 以人工油松林和次生山杨林为例[J]. 应用生态学报, 2005, 16(9): 1597-1602.
- [20] 韩冰, 吴钦孝, 李秧秧, 等. 黄土丘陵区人工油松林地土壤入渗特征的研究[J]. 防护林科技, 2004, 62(5): 1-3.
- [21] 刘贤赵, 黄明斌. 黄土丘陵沟壑区森林土壤水文行为及其对河川径流的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21(2): 72-75.
- [22] 张思祖, 李凯荣, 易亮, 等. 黄土高原沟壑区杏树林地土壤水分时空动态变化及适宜性研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(5): 21-25.
- [23] 刘春利, 邵明安. 黄土高原六道沟流域不同土地利用方式下土壤水力特性及其对土壤水分的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(11): 2400-2407.
- [24] 张晓明, 余新晓, 武思宏, 等. 黄土丘陵沟壑区典型流域土地利用/土地覆被变化水文动态响应[J]. 生态学报, 2007, 27(2): 414-423.
- [25] 刘昌明, 曾燕. 植被变化对产水量影响的研究[J]. 中国水利, 2002(10): 112-117.
- [26] Chen L D, Huang Z L, Gong J. The effect of land cover/vegetation on soil water dynamic in the hilly area of the loess plateau, China[J]. Catena, 2007, 70(2): 200-208.
- [27] 陈杰, 刘文兆, 张勋昌, 等. 黄土高原沟壑区不同树种的水土保持效益及其适应性评价[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2008, 36(6): 97-104.
- [28] Latta J, O'Leary G J. Long-term comparison of rotation and fallow tillage systems of wheat in Australia[J]. Field Crops Research, 2003, 83(2): 173-190.
- [29] Kimura R, Fan J, Zhang X C, et al. Evapotranspiration over the Grassland Field in the Liudaogou Basin of the Loess Plateau, China[J]. Acta Oecologica, 2006, 29(1): 45-53.
- [30] 杨海军, 孙立达, 余新晓. 晋西黄土区水土保持林水量平衡的研究[J]. 北京林业大学学报, 1993, 15(3): 42-50.
- [31] 王进鑫, 罗伟祥, 刘广全, 等. 黄土高原人工林根区土壤水分亏缺状况与空间分布[J]. 西北林学院学报, 2004, 19(4): 1-4.
- [32] 张建军, 张岩, 张波. 晋西黄土区水土保持林地的土壤水分[J]. 林业科学, 2009, 45(11): 63-69.
- [33] 李玲芬, 延军平, 刘冬梅, 等. 干旱/半干旱地区不同植被条件下土壤含水量变化及植被建设途径分析[J]. 水土保持通报, 2009, 29(1): 18-22.
- [34] Zhao C Y, Feng Z D, Chen G D. Soil water balance simulation of alfalfa (*Medicago sativa* L.) in the semi-arid Chinese Loess Plateau[J]. Agricultural Water Management, 2004, 69(2): 101-114.
- [35] 余冬立, 邵明安, 俞双恩. 黄土高原典型植被覆盖下SPAC系统水量平衡模拟[J]. 农业机械学报, 2011, 42(5): 73-78.
- [36] 李海防, 杨章旗, 韦理电, 等. 广西华山林场5种典型人工林水文功能评价[J]. 安徽农业大学学报, 2011, 38(2): 146-150.
- [37] Kimura R, Liu Y, Takayama N, et al. Heat and water balances of the bare soil surface and the potential distribution of vegetation in the Loess Plateau, China[J]. Journal of Arid Environments, 2005, 63(2): 439-457.
- [38] 尹忠东, 朱清科, 毕华兴, 等. 黄土高原植被耗水特征研究进展[J]. 人民黄河, 2005, 27(6): 35-37.
- [39] Wang Y Q, Shao M A, Zhu Y J, et al. 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, 2011, 151(4): 437-448.
- [40] 卢爱刚, 董雯, 赵景波. 陕西长安和曲江人工林地土壤含水量对比研究[J]. 水土保持研究, 2009, 16(3): 155-158.
- [41] 王延平. 陕北黄土区陡坡地土壤水分植被承载力研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- [42] 李军, 陈兵, 李小芳, 等. 黄土高原不同降水类型区林地: 草地与农田土壤干燥化效应比较[J]. 土壤学报, 2008, 45(1): 40-48.
- [43] Bastrup-Birk A, Gundersen P. Water quality improvements from afforestation in an agricultural catchment in Denmark illustrated with the INCA model[J]. Hydrology Earth System Sciences, 2004, 8(4): 764-777.
- [44] Farley K A, Jobbágy E G, Jackson R B. Effects of afforestation on water yield: a global synthesis with implications for policy[J]. Global Change Biology, 2005, 11(10): 1565-1576.
- [45] Huang M B, Zhang L, Gallichand J. Runoff responses to afforestation in watershed of the Loess Plateau, China[J]. Hydrological Processes, 2003, 17(13): 2599-2609.
- [46] 穆兴民, 徐学选, 王文龙, 等. 黄土高原人工林对区域深层土壤水环境的影响[J]. 土壤学报, 2003, 40(2): 210-217.
- [47] Wang Z Q, Liu B Y, Liu G, et al. Soil water depletion depth by planted vegetation on the Loess Plateau[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2009, 52(6): 835-842.
- [48] 李玉山. 黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究[J]. 自然资源学报, 2001, 16(5): 427-432.
- [49] 樊军, 郝明德, 邵明安. 黄土旱塬农业生态系统土壤深层水分消耗与水分生态环境效应[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 61-64.
- [50] 邵薇薇, 杨大文, 孙福宝, 等. 黄土高原地区植被与水循

- 环的关系[J]. 清华大学学报, 2009, 49(12): 1958-1962.
- [51] Crawford M C, Macfarlane M R. Lucerne reduces soil moisture and increases livestock production in an area of high groundwater recharge potential[J]. Australian Journal of Experimental Agriculture, 1995, 35(2): 171-180.
- [52] 李代琼, 梁一民, 侯喜禄, 等. 黄土高原沙棘建造植被的生态功能及效益试验研究[J]. 沙棘, 2003, 16(3): 16-21.
- [53] 程积民, 万惠娥, 王静. 黄土丘陵区山桃灌木林地土壤水分过耗与调控恢复[J]. 土壤学报, 2003, 40(5): 691-694.
- [54] Wang L, Wei S P, Horton R, et al. Effects of vegetation and slope aspect on water budget in the hill and gully region of the Loess Plateau of China[J]. Catena, 2011, 87(1): 90-100.
- [55] Granier A, Biron P, Lemoine D. Water balance, transpiration and canopy conductance in two beech stands[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 100(4): 291-308.
- [56] Roberts J. The influence of physical and physiological characteristics of vegetation on their hydrological response[J]. Hydrological Processes, 2000, 14(16/17): 2885-2901.
- [57] 武阿锋, 刘文兆. 长武塬区不同土地利用条件下土壤水分深剖面分布特征比较[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(5): 133-136.
- [58] 庞敏. 黄土高原植被建设的生态水文效应研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2010.
- [59] 陈洪松, 王克林, 邵明. 黄土区人工林草植被深层土壤干燥化研究进展[J]. 林业科学, 2005, 41(4): 155-161.
- [60] 陈宝群, 赵景波, 李艳花. 黄土高原土壤干层形成原因分析[J]. 地理与地理信息科学, 2009, 25(3): 85-89.
- [61] 陈洪松, 邵明安, 王克林. 黄土区荒草地土壤水平衡的数值模拟[J]. 土壤学报, 2005, 42(3): 353-359.
- [62] 王晓贤, 张学培. 晋西黄土高原土壤水分垂直变化规律及生态影响[J]. 水土保持研究, 2009, 16(2): 200-204.
- [63] 刘晨峰, 王正宁, 贺康宁, 等. 黄土高原半干旱区几种人工林的土壤水分、光照变化及其对林分的影响[J]. 西部林业科学, 2004, 33(3): 34-41.
- [64] 许喜明, 陈海滨, 原焕英, 等. 黄土高原半干旱区人工林地土壤水分环境的研究[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(5): 60-64.
- [65] 杜娟, 赵景波. 黄土高原南部人工植被作用下的土壤水分研究[J]. 土壤, 2010, 42(2): 262-267.
- [66] 万素梅, 贾志宽, 韩清芳, 等. 黄土高原半湿润区苜蓿草地土壤干层形成及水分恢复[J]. 生态学报, 2008, 28(3): 1045-1051.
- [67] 杨磊, 卫伟, 陈利顶, 等. 半干旱黄土丘陵区人工植被深层土壤干化效应[J]. 地理研究, 2012, 31(1): 71-80.
- [68] 张北赢, 徐学选, 李贵玉, 等. 土壤水分基础理论及其应用研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(2): 122-129.
- [69] 陈洪松, 邵明安, 王克林, 等. 黄土区深层土壤干燥化与土壤水分循环特征[J]. 生态学报, 2005, 25(10): 2491-2498.
- [70] 王力, 邵明安, 侯庆春, 等. 黄土高原土壤干层初步研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2001, 29(4): 34-38.
- [71] 李慧成, 郝明德, 杨晓, 等. 黄土高原苜蓿草地在不同种植方式下的土壤水分变化[J]. 西北农业学报, 2009, 18(3): 141-146.
- [72] 游松财, 邸苏闯. 黄土高原地区 1961—2000 年间土壤水分变化模拟与分析[J]. 自然资源学报, 2010, 25(7): 1206-1216.
- [73] Huang M B, Shao M A, Li Y S. Comparison of a modified statistical-dynamic water balance model with the numerical model WAVES and field measurements[J]. Agricultural Water Management, 2001, 48(1): 21-35.
- [74] Zhang S L, Simelton E, Lövdahl L, et al. Simulated long-term effects of different soil management regimes on the water balance in the Loess Plateau, China[J]. Field Crops Research, 2007, 100(2/3): 311-319.
- [75] Jansson P E, Karlberg L. CoupModel-Coupled heat and Mass Transfer Model for Soil-Plant-Atmosphere System[R]. Stockholm: Royal Institute of Technology, Dept. of Land and Water Resources Engineering, 2004.
- [76] Karlberg L, Alon B G, Jansson P E, et al. Modelling transpiration and growth in salinity-stressed tomato under different climatic conditions[J]. Ecological Modelling, 2006, 190(1/2): 15-40.
- [77] Zhang S L, Lovdahl L, Grip H, et al. Modelling the effects of mulching and fallow cropping on water balance in the Chinese Loess Plateau[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 93(2): 283-298.
- [78] Jansson P E, Moon D. A coupled model of water, heat and mass transfer using object orientation to improve flexibility and functionality[J]. Environmental Modelling and Software, 2001, 16(1): 37-46.
- [79] Jansson P E, Cienciala E, Grelle A, et al. Simulated evapotranspiration from the Norunda forest stand during the growing season of a dry year[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1999, 98/99(SI): 621-628.
- [80] Eckersten H, Blombäck K, Kätterer T, et al. Modelling C, N, water and heat dynamics in winter wheat under climate change in southern Sweden[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2001, 86(3): 221-235.