

黄土高原土壤水库及其影响因子研究评述

张 扬^{1,2}, 赵世伟¹, 梁向锋^{1,2}, 蒋正文³

(1. 中国科学院 水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 宁夏水利科学研究所, 银川 750021)

摘 要: 土壤是疏松多孔体, 具有存蓄和调节土壤水分的功能。就目前黄土高原土壤水库及其影响因子进行了评述, 重点阐述了土壤水库功能及其与三个主要影响因子(气象因子、植被因子、土壤因子)的关系, 并对今后的研究做了展望。土壤水库下边界的界定、不同因子对土壤水库的影响以及土壤水库模型的构建等都有待进一步的研究。

关键词: 黄土高原; 土壤水库; 气候; 植被; 土壤; 地形

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2009)02-0147-05

Review of Soil Water Reservoir and Analysis on Influencing Factors in the Loess Plateau

ZHANG Yang^{1,2}, ZHAO Shi-wei¹, LIANG Xiang-feng^{1,2}, JIANG Zheng-wen³

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China; 3. Ningxia Institute of Water Conservancy Science, Yinchuan 750021, China)

Abstract: Soil is the loose and porous body, which has the function of holding and adjusting water. This paper summarized the main problems about soil water reservoir in the Loess Plateau. The reviews are focused on four factors (climate factor, vegetation factor, soil factor and terrain factor). At last, the forecast has been made to the further study in the basis of summing up the studying in the past. The definition of soil water reservoir's bottom boundary and the construction of its related models need further study.

Key words: Loess Plateau; soil water reservoir; climate; vegetation; soil; terrain

土壤水库与陆地生态环境的发展过程有相辅相成的内在联系, 土壤水库功能的变化及其演变是陆地表面生态系统发展变化的关键和动力, 只有维护土壤水库功能的正常发挥才能更好的保护生态环境, 符合黄土高原的演变实际^[1-2]。深厚疏松的黄土层具有很好的存蓄、调节水分的功能。维护住高入渗土壤水库的存在才能确保全部降水就地入渗拦蓄的顺利实现, 抢救和保卫高原土壤水库是黄土高原综合治理与持续发展治本之道。由此可知维持土壤水库是当前黄土高原综合治理的关键和共同攻关目标^[1]。受气候、植被、土壤质地和地形的综合作用, 黄土高原的土壤含水量、土壤水库库容整体上具有时空变异特征^[3], 研究气候、植被、土壤和地形因素

对黄土高原土壤水库的影响及其作用方式, 通过对其影响因子的调控, 布设合理的方案和措施, 为黄土高原土壤水库的维护、发展提供理论基础, 对黄土高原的综合治理具有重要的实践意义。

1 土壤水库的概念

土壤是布满孔隙的疏松多孔体, 能够储蓄天然降水, 满足植被生长的需要, 土层深厚的土壤具有明显的存蓄、调节水分的功能, 称之为土壤水库。土壤水库是联系地面水库和地下水库的纽带, 是地上植被赖以生存的根基。根据土壤水库下边界界定的不同对土壤水库具有不同的定义, 通常意义上的土壤水库是指地面以下, 地下潜水面以上的整个包气带^[4]。

* 收稿日期: 2008-05-15

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划课题(2006BCA010A07, 2006BAD09B08)

作者简介: 张扬(1984-), 女, 蒙古族, 内蒙古通辽人, 硕士研究生, 主要从事土壤水分研究。E-mail: zhangyang06@mails.gucas.ac.cn

通信作者: 赵世伟(1962-), 男, 四川荣县人, 研究员, 主要从事植被与土壤互动关系研究。E-mail: swzhao@ms.iswc.ac.cn

土壤水库的总库容是指土壤整个剖面的孔隙之和,是土壤所能蓄存的最多的水量,也称土壤的蓄水能力,它是土壤水库调控和利用的基础,其大小与土壤类型、结构、质地和地下水埋藏深度关系密切^[4]。土壤水库的总库容是由最大有效库容和死库容组成,最大有效库容则是由滞留库容和吸持库容组成。土壤水库与地面水库有着类似的结构(表 1)^[5]。死库容不能为植物生长所利用,为无效水;吸持库容能够长

期保持并能为植物生长所利用。滞留库容在短时间里能够储存水分,是降雨进入土壤的主要通道^[6]。

传统的土壤水库计算方法是假定样地内土壤水平方向上的均质分布,土壤水库储水量为土壤容积含水量在各个土层上加权。但事实上土壤水分在水平和垂直方向上都是存在空间异质性的,因此应多采用地理统计或点、面格局分析的方法建立三维模型来计算土壤水库容量,提高计算精度。

表 1 地面水库与土壤水库技术指标比照

技术指标	地面水库	土壤水库
死库容	死水位以下库容	凋萎含水量
兴利库容/吸持库容	死水位与正常蓄水位间库容	凋萎含水量与田间持水量之差
防洪库容/滞留库容	正常蓄水位与防洪高水位间库容	田间持水量与饱和含水量之差
最大库容	死库容+调节库容+滞留库容	饱和含水量
最大蓄水量/最大有效库容	调节库容+滞留库容	饱和含水量和凋萎含水量之差
调节库容	每次洪水过程增蓄水量之和	每次降雨或灌水后土壤水分增值之和

黄土高原土层深厚地区,若研究整个包气带难度非常大,而且下层土壤水分变化小,在生态学上比较有意义的库容为降水入渗或植物吸收下边界以上的这一部分库容,为土壤生态库容。确定土壤生态库容的边界成为又一个新的难题。水平范围上其边界随研究目的和尺度的大小而不同,如植被对土壤水库的影响其边界应与群落样地边界一致;垂直范围上其生态库容应为降水入渗或植物吸收利用的下边界。这一边界过去或者通常用植物根系深度来代表,或者用土钻法直观地判断,带有很强的直观性和随意性。研究表明:黄土高原退耕草地植被根系集中在 0 - 40 cm 的表土层中^[7],而刺槐等的根系可达 1 000 cm 之深。降雨的入渗深度有限,最大入渗深度 300 cm^[8-9]。黄土高原高产农田蒸发蒸腾作用层深达 500 cm 以下,林、草、灌、果作用层深达 1 000 cm^[10]。因此,把植物吸水有效性的下限作为生态库容的下限较为合理。

2 黄土高原土壤水库的特点和功能

2.1 黄土高原土壤水库的特点

黄土高原土壤水库具有容量大、瓶颈小、蒸发强的特点^[11-13]。黄土高原土层深厚,并具有良好的孔隙度(50 % ~ 55 %),因此土壤具有巨大的蓄水功能。大气降水是黄土高原土壤水库的主要水源,只有入渗到土壤中的水分才能成为土壤水库的水源,稳定入渗率低成为制约水库功能的瓶颈。因此,维护高入渗性能,才能发挥土壤水库的功能。黄土疏松质地均一,毛管孔隙发达,具有极强的蒸发性能^[14]。

2.2 土壤水库的功能

土壤水库的功能包括:蓄水功能、供水功能、水文调节和侵蚀控制功能。250 万年以来,堆积了 100 ~ 200 m 厚的黄土 - 古土壤系列,黄土孔隙发达,土壤水库具庞大的库容。据测定,黄土高原 200 cm 土层的持水容量可达 551.1 ~ 847.4 mm^[15]。土壤通过调节自身含水量、灵活供应毛管水,可将大气降水和灌溉等间歇性供水转变为对作物的连续均匀供水,在不良条件下,也能保证供应作物生长所需水分。黄土高原特殊的沉降方式(自重降落、凝聚降落、雨淋降落)形成多孔状结构体,对水和气良好的通透性能^[1],可使降水具有直接渗入“土壤水库”。土壤充分拦蓄降雨,减少地表径流,减少河流的输沙量。充分调用“土壤水库”也是实现防洪防涝灾害的重要途径之一^[16]。

3 土壤水库功能的影响因子

土壤水库功能的影响因子主要为气候因子、植被因子、土壤因子和地形因子。其中植被因子和土壤因子通过改变土壤水库基本性质,影响土壤水库的理论库容和实际库容;而气候因子和地形因子仅对实际库容起作用。

3.1 气候因子

黄土高原丘陵沟壑区土层深厚,地下水埋深一般在 60 ~ 100 m 以下,很难通过上移补充土壤水分。气候条件决定了干旱区土壤水库的水分来源和蒸发的强弱,土壤水分含量受降雨和蒸发的影响^[17]。天然降水是土壤水库的主要来源,影响土壤

水库的蓄水功能;蒸发则影响土壤水库供水功能。黄土高原降水量(P)多分布在200~500 mm之间,年蒸发量(E_0)为1 400~2 200 mm^[18-19],全区 $E_0 > P$ 。在干旱年,土壤储水量处于负补偿,入渗雨量全被蒸发蒸腾作用所消耗。因此,减少土面蒸发是增加土壤水库蓄水功能的重要手段。黄土旱塬农田全程全覆盖有利于“土壤水库”蓄水量的增加,如降雨量为139.5~354.5 mm的情况下,覆盖处理使200 cm土壤储水量提高53.0~111.3 mm^[20]。降雨量和蒸发量实质上都是由点降雨量和蒸发量而来,目前的研究都是将一个点的气象状况或者是区域内多个点的平均值描述整个区域,及对土壤水分的影响,而土壤水库是一个区域上的整体,显然用一个点的概念来研究区域变化是不合适的。

3.2 土壤因子

土壤结构性是影响土壤水分状况最重要的因素,特别是团聚体及其稳定性对土壤渗透性、持水性等有直接作用^[21-22],影响土壤水库功能。土壤结构决定了土壤水分动态变化,通过对土壤孔隙状况的影响,影响土壤的水力传导度和土壤水分运动驱动力-土水势梯度,进而影响到土壤的入渗能力。黄土有机质缺乏,加上该区降水集中,降雨强度大,在雨水打击作用下,团聚体分散,土壤颗粒堵塞入渗毛孔,引起超渗产流^[23],导致水土流失,土壤水库的蓄水功能、水文调节和抗侵蚀功能得不到发挥。

土壤水稳性团聚体含量、有机质、容重、孔隙状况等均与土壤水分入渗性质有很强的相关性^[11-12]。赵勇钢^[12]、杨永辉^[11]对坡耕地自然退耕草地不同雨强下土壤入渗性能进行了研究,表明土壤中有机碳含量的增加是提高土壤结构稳定性的重要因子,能够降低容重,改善孔隙状况等土壤物理性质,从而改善了降雨入渗过程及入渗率,恢复土壤水库功能。

3.3 植被因子

植被作为重要的生态因子,是影响土壤水库功能最活跃最积极的因素,对土壤水分的补给、消耗、储存、更新和平衡等都有影响。植被对土壤水库一方面具有正面的影响,如调节拦蓄降水、创建和补给土壤水库、控制水土流失等功能;另一方面植被的生长,尤其是不合理的人工植被,通过蒸腾作用消耗大量土壤水分,土壤水库蓄水功能枯竭,供水功能衰退。

植被恢复过程中通过根系的穿插作用和对土壤性质的改善,增加土壤大孔隙,提高雨水入渗速率,巩固并提高土壤水库功能。首先,随着植被恢复,土壤有机质、养分、微生物量等土壤性质明显提高^[24-25],配合须根的穿插和缠结,土壤生物大孔隙增

加,结构和孔隙状况改善^[26-27],土壤水库蓄水能力提高;同时土壤抗冲性和抗剪强度强化^[28],土壤水库的水文调节和侵蚀控制功能得以发挥。其次,树冠和枯枝落叶层能有效减少雨滴对土粒的击溅,保护大孔隙的畅通,地表粗糙度增加,减慢坡地漫流,增加雨水停留时间,利于水分入渗。很多研究表明植被恢复增加了水分入渗速率^[12],增大土壤水库的“瓶颈”,使降雨顺利进入“土壤水库”,增加土壤水库储水量。赵世伟^[29]通过对子午岭北部植物演替过程的土壤水分特征研究发现,植被恢复增加土壤毛管孔隙等土壤物理性质,对土壤的蓄水和持水性能产生积极的作用,乔木林地土壤储水量最大,较撂荒地和草地、灌木地的增幅分别达68%~79%、41%~50%和15%~20%。

在黄土高原半干旱地区,虽然季节性的径流和蒸发潜力较大,但在植被的参与下,植物蒸腾仍然是水分平衡中最主要的输出项^[30-31]。随着植被生产力的提高和生长状况的改善,植物蒸腾量对土壤水分的消耗量也增大。尤其不适当的植被措施导致土壤干燥化,出现土壤干层^[30-32],降低了土壤水库的供水功能^[33]。人工植被消耗大量的深层土壤水分,特别是20 a以上的人工林地及人工草地,其200~500 cm土层的土壤含水量几乎接近凋萎湿度^[34]。不同植被对土壤水分的消耗也不同,如10 a以上苜蓿地900 cm以下土壤水分达到土壤干层的下限,水分难以恢复^[35],老龄期柠条土壤干层出现在700 cm^[36]。人工植被下,土壤干燥化加剧,限制了地被物生长量和盖度,地表裸露,缺少植被保护,导致表层土壤结构破坏。

目前在植被恢复过程中对土壤水分性质变化的研究,均为短期试验,缺乏长期定位观测,而且研究方法多以空间代替时间,忽略了各植被恢复阶段立地条件差异和空间的不连续性。建立长期定位观测,完善研究方法是研究植被和土壤水库互动的必要条件。

3.4 地形因子

黄土丘陵小流域土壤水分空间异质性是多重尺度上的环境因子共同作用的结果^[37]。土壤储水量由于坡位、坡向不同差异很大。随着坡度的增加而减小,5°>18°>30°,阴坡>半阴坡>阳坡,下部>中部>上部^[38]。在坡上修建了水平阶后,沿坡长方向土壤储水量趋于均匀^[39],阴坡土壤年均储水量远比阳坡高111.9 mm^[40]。相对海拔、土壤的排水特性和土地利用对土壤水分的变异影响显著^[41-44]。不同的治理模式对土壤水分也产生不同的影响。研究表

明:大面积的坡地治理会破坏原有土壤结构,引起 40 cm 以上表层土壤水分蒸发强烈,不同措施的土壤含水率顺序为隔坡梯田 > 大台田 > 坡耕地^[45]。梯田田面宽度小于 4 m 的梯田,田坎侧向蒸发对田面土壤水分及作物产量的影响显著^[46]。研究多见于坡面尺度对土壤水分的影响,而将土壤作为一个“水库”,在流域尺度或区域尺度上地形对土壤水库影响的研究不足。

4 土壤水库相关模型的研究

土壤水库相关过程涉及到降雨入渗、植物蒸腾、地表蒸发、植被截流、地表径流、土壤水分再分配等过程。主要分为 4 个部分:与土壤有关的过程,与植物有关的过程(截流),林地蒸散过程(蒸发、蒸腾),以及坡度坡向对以上 3 个过程的影响。贾海坤等^[47]建立了柠条林地土壤水分与坡度坡向的关系,模拟了土壤水分与坡向、坡度、植被盖度之间的关系,得出以下结论:土壤水分随植被盖度增加而降低。小于 10°的坡地,适宜盖度对坡度反应敏感,当坡度大于 10°时,适宜盖度对坡度反应不敏感。杜峰等^[48]利用多元回归和通径分析对黄土丘陵区撂荒演替过程中的土壤水分效应进行研究,结果表明:用地形因子、土壤因子、植被因子可以很好地对土壤水分拟合,植被盖度是影响表层土壤水分含量和根系层水分波动的主导因子,地上生物量影响深层土壤水分波动。

5 展望

对于土壤水库的研究大多停留在对土壤蓄水量进行描述,而土壤水库在各种环境因子综合作用的结果,应加强不同影响因子或多个影响因子共同作用下土壤水库功能的研究。对黄土高原土壤水的研究,目前的研究多以土壤水分作为研究对象,研究不同影响因子对其含量的影响,研究尺度小。土壤水库作为一个“库”,是一个整体概念,因此对于土壤水库的研究应在研究尺度和研究方法上进行转变,将涡动相关、红外遥测和遥感技术等应用与土壤水库的研究是大势所趋。但从点到面、从地块尺度到区域尺度的数据整合、尺度推绎仍有很多理论和方法未解决,限制了大尺度的研究。

将各环境因子进行综合研究,充分考虑立地条件对土壤水库的影响,是建立黄土高原土壤水库模型的必然发展方向。目前仍通用的一些水文模型,多为经验模型,将土壤作为一个黑箱或灰色系统来对待。只有将土壤本身的基本性质(如有机碳含量、结构稳定

性、孔隙度、容重、持水性能等)和土壤水分过程(如土壤入渗过程、植物根系吸水过程、土面蒸发过程等)引入模型中,才能很好地模拟土壤水库形成过程、功能及机理,准确评价和预测土壤水库功能和潜力。

参考文献:

- [1] 朱显谟. 抢救“土壤水库”实为黄土高原生态环境综合治理与可持续发展的关键[J]. 水土保持学报, 2000, 14(1): 1-6.
- [2] 朱显谟. 重建土壤水库是黄土高原治本之道[J]. 中国科学院院刊, 2006, 21(4): 320-324.
- [3] 穆兴民. 试论黄土区旱地土壤水资源的地带性与非地带性[J]. 土壤学报, 1999, 36(2): 237-244.
- [4] 郭凤台. 土壤水库及其调控[J]. 华北水利水电学院学报, 1996, 17(2): 72-80.
- [5] 孙仕军, 丁跃元. 平原井灌区土壤水库调蓄能力分析[J]. 自然资源学报, 2002, 17(1): 42-47.
- [6] 郭忠升, 任锁堂. 森林植被对土壤入渗速率的影响[J]. 陕西林业科技, 1996(3): 27-31.
- [7] 李鹏, 李占斌, 澹台湛. 黄土高原退耕草地植被根系动态分布特征[J]. 应用生态学报, 2005, 16(5): 849-853.
- [8] 李玉山. 黄土区土壤水分循环及其对陆地水文大循环的影响[J]. 生态学报, 1983, 3(3): 91-101.
- [9] 李玉山. 黄土高原治理开发与黄河断流的关系[J]. 水土保持通报, 1997, 17(6): 41-45.
- [10] 黄明斌, 杨新民, 李玉山. 黄土高原生物利用型土壤干层的水文生态效应研究[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(3): 113-116.
- [11] 杨永辉, 赵世伟, 雷廷武, 等. 宁南黄土丘陵区不同植被下土壤入渗性能[J]. 应用生态学报, 2008, 19(5): 1040-1045.
- [12] 赵勇钢, 赵世伟, 曹丽花, 等. 半干旱典型草原区退耕地土壤结构特征及其对入渗的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 14-20.
- [13] 李玉山. 土壤水库的功能和作用[J]. 水土保持通报, 1983, 3(5): 27-30.
- [14] 韩仕峰, 李玉山. 黄土高原土壤水分资源特征[J]. 水土保持通报, 1990, 10(1): 36-43.
- [15] 杨文治. 黄土高原土壤水资源与植物造林[J]. 自然资源学报, 2001, 16(5): 433-438.
- [16] 史学正, 梁音. “土壤水库”的合理调用与防洪减灾[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(3): 6-10.
- [17] 焦峰, 温仲明, 焦菊英, 等. 黄土丘陵区人工小叶杨生长空间差异及其土壤水分效应[J]. 西北植物学报, 2005, 25(7): 1303-1308.
- [18] 黄奕龙, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 黄土丘陵小流域植被生态用水评价[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2): 152-155, 194.

- [19] 姚小英, 蒲金涌, 王澄海, 等. 甘肃黄土高原 40 a 来土壤水分蒸散量变化特征[J]. 冰川冻土, 2007, 29(1): 126-130.
- [20] 苏彩虹, 郭创业. 黄土旱塬农田全程全覆盖的“土壤水库”作用[J]. 水土保持学报, 2001, 15(4): 87-91.
- [21] Bissonnais L. Y. Aggregate stability and assessment of soil crust ability and erodibility[J]. European Journal of soil science, 1996, 47: 425-437.
- [22] Boix F C. The role of texture and structure in the water retention capacity of burnt Mediterranean soils with varying rainfall[J]. Catena, 1997, 31(3): 219-236.
- [23] 朱显谟. 黄土高原水蚀的主要类型及其有关因素[J]. 水土保持通报, 1981, 1(3): 1-9.
- [24] 王国梁, 刘国彬. 黄土丘陵区纸坊沟流域植被恢复的土壤养分效应[J]. 水土保持通报, 2002, 22(1): 1-5.
- [25] 赵世伟, 苏静, 吴金水, 等. 子午岭植被恢复过程中土壤团聚体有机碳含量的变化[J]. 水土保持学报, 2006, 20(3): 114-117.
- [26] 吴彦, 刘世全. 植物根系提高土壤水稳性团粒含量的研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(1): 45-49.
- [27] 安韶山, 张扬, 郑粉莉. 黄土丘陵区土壤团聚体分形特征及其对植被恢复的响应[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(2): 66-70, 82.
- [28] 刘国彬. 黄土高原草地土壤抗冲性及其机理研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(1): 93-96.
- [29] 赵世伟, 吴金水. 子午岭北部不同植被类型土壤水分特征研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(4): 119-122.
- [30] 李代琼, 姜峻. 安塞黄土丘陵区人工草地水分有效利用研究[J]. 水土保持研究, 1996, 3(2): 66-74.
- [31] 孙长忠, 黄宝龙. 黄土高原人工植被与其水分环境相互作用关系研究[J]. 北京林业大学学报, 1998, 20(3): 7-14.
- [32] 穆兴民, 徐学选. 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.
- [33] 侯庆春, 韩蕊莲. 黄土高原植被建设中的有关问题[J]. 水土保持通报, 2000, 20(2): 53-56.
- [34] 焦菊英, 焦峰, 温仲明. 黄土丘陵沟壑区不同恢复方式下植物群落的土壤水分和养分特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(5): 667-674.
- [35] 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.
- [36] 程积民, 万惠娥, 王静, 等. 半干旱区柠条生长与土壤水分消耗过程研究[J]. 林业科学, 2005, 41(2): 37-41.
- [37] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 等. 黄土丘陵小流域土壤水分的空间异质性及其影响因子[J]. 应用生态学报, 2001, 12(5): 715-720.
- [38] 马祥华, 白文娟, 焦菊英, 等. 黄土丘陵沟壑区退耕地植被恢复中的土壤水分变化研究[J]. 水土保持通报, 2004, 24(5): 19-23.
- [39] 李华, 吴发启, 张青峰, 等. 黄土高原丘陵沟壑区土壤储水量年变异特征[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(13): 3919-3920, 4008.
- [40] 陈洪松, 邵明安, 王克林. 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.
- [41] Henninger D L, Petersen G W, Engman E T. Surface soil moisture within a watershed: variations, factors influencing, and relationships to surface runoff[J]. Soil Science Society of America Journal, 1976, 40(5): 773-776.
- [42] Gomez-plaza A, Martinez-mena M, Albaladejo J. Factors regulating spatial distribution of soil water content in small semiarid catchment[J]. Journal of Hydrology, 2001, 253: 211-226.
- [43] Jun W, Bojie F, Yang Q. Geostatistical analysis of soil moisture variability on Danangou catchment of the Loess Plateau, China[J]. Environment Geology, 2001, 41: 113-120.
- [44] Graysom R B, Western A W. Towards areal estimation of soil water content from point measurements: Time and space stability of mean response[J]. Journal of Hydrology, 1998, 207: 68-82.
- [45] 张海, 张立新, 柏延芳, 等. 黄土峁状丘陵区坡地治理模式对土壤水分环境及植被恢复效应[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 108-113.
- [46] 杨开宝, 李景林. 黄土丘陵区第 I 副区梯田断面水分变化规律[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(2): 64-69.
- [47] 贾海坤, 刘颖慧, 徐霞, 等. 皇甫川流域柠条林地水分动态模拟: 坡度、坡向、植被密度与土壤水分的关系[J]. 植物生态学报, 2005, 29(6): 910-917.
- [48] 杜峰, 山仑, 梁宗锁, 等. 陕北黄土丘陵区撂荒演替过程中的土壤水分效应[J]. 自然资源学报, 2005, 20(5): 669-678.