

乌兰木伦河径流量衰减驱动因素研究

朱金方^{1,2}, 全占军², 王琦², 韩煜², 付梦娣², 叶瑶^{2,3}

(1. 中国矿业大学(北京) 化学与环境工程学院 恢复生态研究所, 北京 100083;

2. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 3. 南京农业大学, 南京 210095)

摘 要:以乌兰木伦河为研究对象,通过调查分析乌兰木伦河年径流量、降雨量、年均气温、人口、煤炭产能、GDP 等的变化特征,探讨各因素对乌兰木伦河径流量的作用特点,以确定乌兰木伦河径流量衰减的主要驱动因素及其贡献比例。结果表明:由于自然和社会因素的共同作用,乌兰木伦河年径流量呈不断衰减趋势;乌兰木伦河径流量影响因素中,以降雨量和年均气温为主的自然因素所占比重为 19.4%,而以人口、煤炭产能和 GDP 为主的社会因素所占比重为 80.6%。目前社会因素是影响乌兰木伦河径流量衰减的主导因素。

关键词:乌兰木伦河; 径流量; 自然因素; 社会因素

中图分类号:TV121.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2014)01-0034-05

Study on the Driving Factors on the Runoff Reduction of Ulan Moron River

ZHU Jin-fang^{1,2}, QUAN Zhan-jun², WANG Qi², HAN Yu², FU Meng-di², YE Yao^{2,3}

(1. *Institute of Restoration Ecology, College of Chemical and Environmental Engineering,*

China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 2. China Research Academy of

Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: The change characteristics of the annual runoff, precipitation, annual mean temperature, population, coal production and GDP was analyzed and the effects of those factors on the Ulan Moron River runoff was discussed to identify the main driving factor of the runoff reduction of Ulan Moron River. The results showed that Ulan Moron River runoff trended to reduce because of the combined function of natural and social factors. Among the influencing factors of Ulan Moron River, the natural factors including precipitation and annual mean temperature accounted for 19.4%, and the social factors including population, coal production and GDP accounted for 80.6%. And at present, the social factors are the dominant key to the runoff reduction of Ulan Moron River.

Key words: Ulan Moron River; runoff; natural factors; social factors

随着人类对自然干预能力的加强及全球气候的变化,流域水循环的演变十分显著^[1]。全球气候变化改变了原有的气温、降水等与水循环密切相关的气候因子,人类活动改变了流域地表状况,影响着蒸发、入渗、产流、汇流特性,而且在原有的天然水循环内产生了人工侧支循环^[2]。探索环境变化(包括全球气候和人类活动影响)下的水循环及水资源演变规律是当前的研究热点^[3]。河流径流量是水循环生态过程的关键指标^[4],对河流径流量变化特征及其驱动因素进行分析有助于我们深刻认识地表水循环过程及变化特征,同时也为流域内水资源的合理分配及生态环境

保护提供理论依据。

乌兰木伦河流域蕴藏着丰富的煤炭资源,为我国重要的煤炭化工能源基地,现有大柳塔、活鸡兔、哈拉沟等年产千万吨矿井数十座,每年为国民经济输送原煤约 2.7 亿 t。随着生产、生活用水的不断增加及采煤塌陷的强烈干扰,乌兰木伦河径流量显著减少,导致了一系列生态环境问题的产生,例如,河道萎缩、河口沉积、下游河流干枯以及河流功能减弱等。国内学者的诸多研究表明,煤炭开采及相关产业发展与水资源破坏有着较强的相关性^[5-7],但前者对后者贡献比例的定量化研究很少。本文通过调查分析乌兰木伦

收稿日期:2013-06-20

修回日期:2013-07-16

资助项目:中央级公益性科研院所基本科研业务专项(2013-YSKY-14)

作者简介:朱金方(1986—),男,山东曹县人,在读博士研究生,主要从事生态修复方面的研究。E-mail:zhujinfangcom@163.com

通信作者:全占军(1979—),男,河北张家口人,博士,副研究员,主要从事环境评价方面的研究。E-mail:quanzj@craes.org.cn

河年径流量、降雨量、年均气温、人口、煤炭产能、GDP 等的变化特征, 探讨各因素对乌兰木伦河径流量的作用特征, 采用相关分析法和主成分分析法, 最终确定乌兰木伦河径流量衰减的主要驱动因素及其贡献比例。

1 研究区概况

乌兰木伦河发源于内蒙古东胜市柴登乡巴定沟, 自西北向东南经内蒙古东胜区、伊金霍洛旗流入陕西省神木县境内, 在王道恒塔处与东北向的悖牛川汇合后称为窟野河。该河流全长约 138 km, 流域面积约 3 857 km²。河流西岸是鄂尔多斯高原的延续, 东岸是黄土高原丘陵区北部边缘带。流域地理坐标范围为: 经度 109°33′—110°10′, 纬度 39°01′—39°30′^[6]。

该流域是典型的生态脆弱区, 位于毛乌素沙地向黄土高原过渡区域, 年均降水量 340 mm, 年均蒸发量高达 1 978.7 mm, 平均土壤侵蚀模数 0.92 万 t/(km²·a), 局部地区高达 3~4 万 t/(km²·a), 是黄河流域水土流失最严重的地区和黄河粗泥沙的主要产区。地带性植被为典型草原, 但植被覆盖度低且以一年生和沙生植物为主, 土壤沙化程度高, 生态系统自我恢复能力弱。

乌兰木伦河流域大规模煤炭资源开采始于 20 世纪 80 年代中期, 该流域 70% 土地属于矿区, 目前是我国开发强度最大, 产量最高的地区。矿区内普遍采用长臂式机械化采煤工艺, 大大提高了采煤效率, 促进区域经济繁荣的同时, 引发了一系列生态环境问题。

2 材料和方法

2.1 数据资料来源

乌兰木伦河年径流量(1966—2012 年)、流域降雨量(1966—2012 年)以及年均温度(1985—2012 年)数据来自陕西省榆林市王道恒塔水文站。本文有关煤炭产能、人口数量以及国民生产总值(GDP)等数据, 主要通过查阅文献及伊金霍洛旗和神木县统计年鉴得到, 由于乌兰木伦河流域煤炭开采主要是从 20 世纪 80 年代中期开始的^[8], 所以只选择了从 1985—2012 年的统计数据作为分析数据。

2.2 研究方法

首先, 通过 SPSS 软件对乌兰木伦河径流量及其影响因素变化特征及变异系数进行分析; 其次, 采用相关分析法对径流量与其驱动因素之间的相关性进行分析; 最后利用主成分分析法从各个驱动因素中提取主要影响因子。

3 结果与分析

3.1 乌兰木伦河河流径流量变化特征

乌兰木伦河近 50 a 年径流量变化趋势如图 1 所示, 径流量的变化主要为 3 个阶段, 1966—1986 年为第一阶段, 这一阶段内乌兰木伦河年径流量变化波动性规律比较明显, 主要在 2.5 亿 m³ 上下波动, 1979 年达到最大, 为 3.84 亿 m³; 从 1986 年之后, 径流量明显降低; 1987—1996 年为第二阶段, 该阶段内乌兰木伦河年径流量在 1.5 亿 m³ 上下波动; 而从 1997—2012 年为第三阶段, 在该阶段内乌兰木伦河径流量又降到一个较低水平, 平均年径流量只有 0.67 亿 m³。1966 年—2012 年, 乌兰木伦河年径流量变异系数为 0.56, 表明其变化差异性较大。

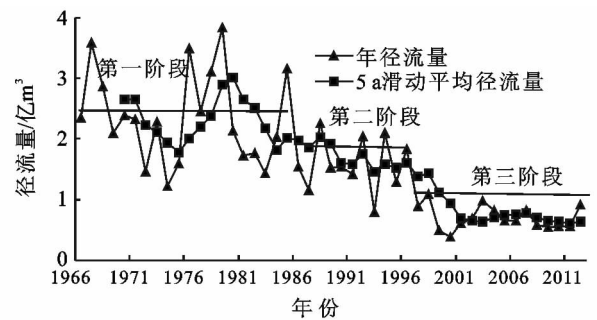


图 1 乌兰木伦河年径流量 5 a 滑动平均

3.2 乌兰木伦河流域年降雨量变化特征

降水是乌兰木伦河地表径流的主要补给源。如图 2a 所示, 乌兰木伦河流域年降雨量变化趋势呈现出一定的波动性, 但总体保持稳定, 从 1966—2012 年一直在 400 mm 左右正常波动, 变异系数为 0.25。由图 2b 可以看出, 1966—1986 年之间的 20 a 间, 乌兰木伦河流域年降雨量和年径流量变化趋势具有较高的一致性, 说明乌兰木伦河年径流量在该阶段内主要受流域降雨量的影响; 1987—1996 年, 流域内平均年降雨量整体保持稳定, 而河流年径流量开始衰减, 表明人为因素对乌兰木伦河径流量的影响开始介入; 1997—2012 年, 乌兰木伦河流域内降雨量仍保持稳定, 但径流量却达到一个较低水平, 说明降雨量对乌兰木伦河变化的影响减小, 人为因素成为影响乌兰木伦河径流量的主导因素。

3.3 乌兰木伦河流域年均气温变化特征

如图 3 所示, 1985—2012 年乌兰木伦河流域年均气温呈周期性波动变化, 总体呈明显升高趋势。1985 年年均气温最低, 为 5.3℃, 最高年均气温为 1998 年的 8.1℃。近 28 a 内平均每年气温升高 0.07℃, 年均气温变异系数为 0.11, 波动性较小。乌兰木伦河流域内蒸发量也会随着气温的升高而增加, 这也是导致乌兰木伦河径流量衰减的一个主要因素。

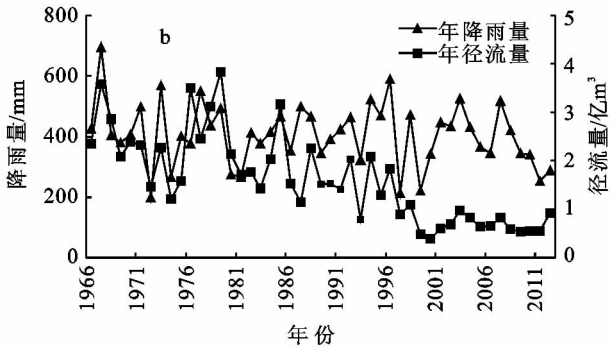
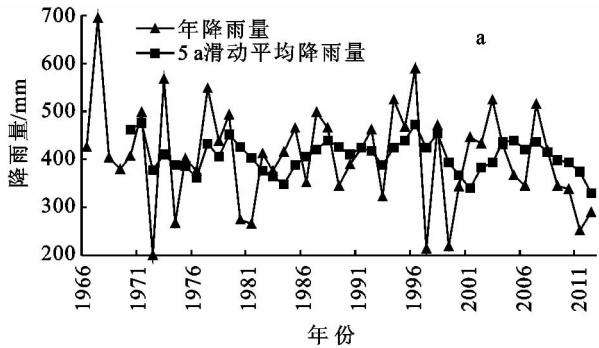


图 2 乌兰木伦河降雨量变化

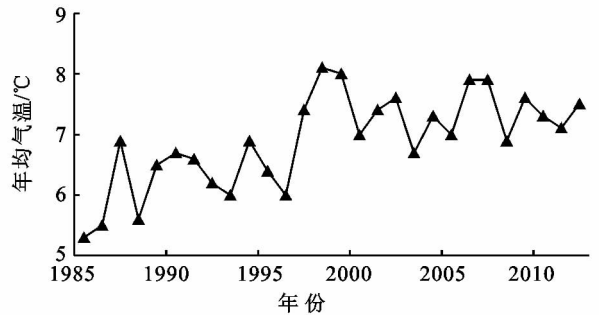


图 3 乌兰木伦河流域年均气温变化

3.4 乌兰木伦河流域内人口数量变化分析

乌兰木伦河流域人口数量一直在不断增加,但不同时间段增加速度不同。如图 4 所示,1985—1992 年人口数量一直在 20 万以下,平均每年增加 0.2 万人;1993—2005 年人口数量增加缓慢,平均每年增加 900 人;从 2005 年以后,乌兰木伦河流域内人口迅速增加,到 2012 年,平均每年增加 5 700 人,是 1993—2005 年这一阶段人口增速的 6.3 倍。为了满足区域经济社会发展的需求,许多流域外人员进驻到流域内,区域水资源来自人口方面的压力也随之增加,人口因素也相应成为了乌兰木伦河径流量衰减的一个驱动因素。

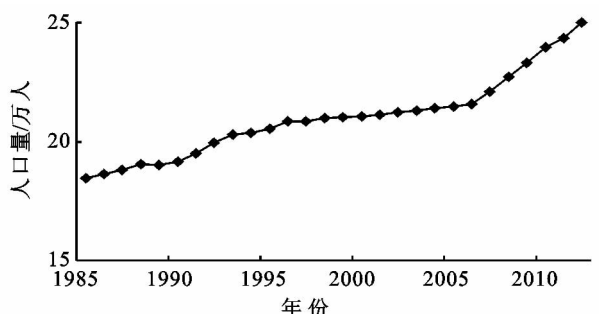


图 4 乌兰木伦河流域人口数量变化

3.5 乌兰木伦河流域内煤炭产能的变化分析

如图 5 所示,1985—1992 年,乌兰木伦河流域煤炭生产都处于一个较低的水平,煤炭年产能不足 100 万 t。从 1993 年开始,煤炭产能快速提高,直至 1998 年,5 a 的时间突破了千万 t。从 2000 年开始,乌兰木

伦河流域内煤炭产能呈指数式增长,到 2012 年,煤炭年产能达到了 2.7 亿 t,占全国煤炭产能的 7.3%。

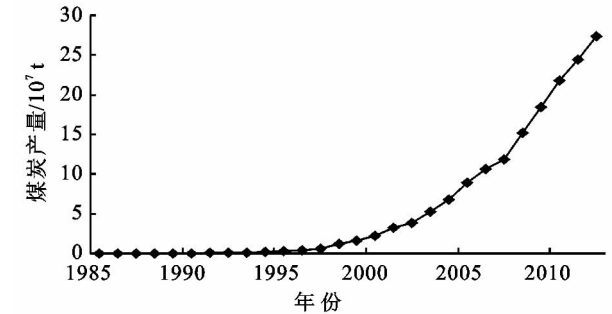


图 5 乌兰木伦河流域煤炭产能变化

3.6 乌兰木伦河流域内国内生产总值 (GDP) 变化分析

乌兰木伦河流域内的 GDP 变化在一定程度上反映了乌兰木伦河流域整体的经济发展水平。如图 6 所示,从 1985 年到 2000 年乌兰木伦河流域 GDP 增长缓慢,平均每年增长 1.7 亿元。2000 年以来,乌兰木伦河流域 GDP 呈指数型增长,到 2012 年,GDP 达到了 1 110 亿元,平均每年增长 90.3 亿元,是 2000 年以前的 53 倍。GDP 的显著升高表明社会经济发展水平的不断提高,社会工农业发展对用水的需求量也相应增加,而这部分用水主要来自乌兰木伦河和地下水,因此也进一步导致了乌兰木伦河径流量的减少。

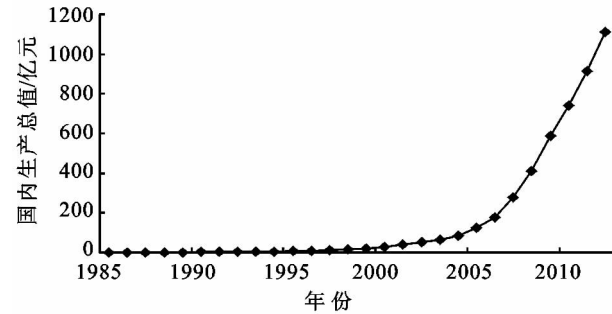


图 6 乌兰木伦河流域内 GDP 变化

3.7 乌兰木伦河径流量影响因素相关分析

对上述各个影响乌兰木伦河年径流量的因素进行相关性分析,结果如表 1 所示。乌兰木伦河年径流

量与降雨量在 $p<0.01$ 水平上呈极显著正相关,表明降雨量与年径流量具有一致的变化趋势,年径流量随着降雨量的升高而增加,或随着降雨量的降低而减少,但一些年份变化趋势不明显;年径流量与年均气温、人口、煤炭产能均在 $p<0.01$ 水平上呈极显著负相关,表明气温、人口数量、煤炭产量等方面压力的增加导致乌兰木伦河径流量不断减少;GDP 与年径流量在 $p<0.05$ 水平上呈显著负相关,表明随着经济的发展,GDP 的提高对乌兰木伦河径流量也有一定程度的影响,主要是因为社会发展过程中对水资源的大量需求,可看作是一个间接影响因素。

表 1 乌兰木伦河年径流量驱动因素相关性分析

	GDP	降雨量	年均气温	人口	煤炭产能
年径流量	0.481**	-0.730**	-0.646**	-0.499**	-0.389*

注: ** 表示在 0.01 显著性水平上相关; * 表示在 0.05 显著水平上相关。

3.8 驱动力主成分分析

通过对乌兰木伦河年径流量与其影响因素的相关分析可知,降雨量、年均气温、人口、煤炭产能以及 GDP 均与年径流量显著相关,均可作为乌兰木伦河径流量衰减的主要驱动因素。主成分分析结果(表 2)表明,第一主成分和第二主成分的累积贡献率达到 83.185%,按照累积贡献率高于 80% 的原则,第一和第二主成分即可作为主要成分来反映降雨量、年均气温、人口、煤炭产能以及 GDP 5 个因素的信息。

表 2 主成分特征值及贡献率

主成分	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
1	3.343	66.856	66.856
2	0.816	16.329	83.185
3	0.742	14.839	98.024
4	0.076	1.528	99.552
5	0.022	0.448	100.000

从表 3 中可以看出,在第一主成分中,人口、煤炭产能和 GDP 3 个因素的载荷都在 0.90 以上,因此第一主成分主要反映了这 3 个因素的信息,可将第一主成分称为社会因素(F_1);而在第二主成分中,降雨量的载荷远远高于其他因素,第二主成分主要反映了降雨量的信息,因此可将第二主成分称为自然因素(F_2)。根据主成分特征值和因子载荷矩阵可求出各主成分下每个因子相应的系数,结果如表 4 所示。 F_1 和 F_2 表达式如下:

社会因素 $F_1 = -0.2850X_1 + 0.3391X_2 + 0.5223X_3 + 0.5223X_4 + 0.5081X_5$

自然因素 $F_2 = 0.8303X_1 - 0.3742X_2 + 0.1716X_3 + 0.2646X_4 + 0.2668X_5$

表 3 因子载荷矩阵

因素	主成分 F_1	主成分 F_2
X_1 (降雨量)	-0.521	0.750
X_2 (年均气温)	0.620	-0.338
X_3 (人口)	0.955	0.155
X_4 (煤炭产能)	0.955	0.239
X_5 (GDP)	0.929	0.241

表 4 因子系数矩阵

因素	主成分 F_1	主成分 F_2
X_1 (降雨量)	-0.2850	0.8303
X_2 (年均气温)	0.3391	-0.3742
X_3 (人口)	0.5223	0.1716
X_4 (煤炭产能)	0.5223	0.2646
X_5 (GDP)	0.5081	0.2668

根据主成分的特征值,得出影响乌兰木伦河径流量变化的因素中,社会因素的权重为 80.4%,而自然因素权重为 19.6%。乌兰木伦河径流量衰减因素主成分综合模型 $F_{综}$ 为:

$F_{综} = 0.804F_1 + 0.196F_2$

4 讨论和结论

4.1 讨论

河流径流量的影响因素主要包括自然因素和社会因素。但是,在不同的发展阶段,对于河流径流量影响的主导因子不同。杨新等^[9] 在对无定河径流量驱动因子的研究中,认为自然因素和人为因素对无定河径流量的影响分为两个阶段,1971 年以前主要以自然因素为主要驱动因子,而 1971 年以后,人为因素成为影响无定河径流量的主要驱动因子,并在 1997 年达到最大;李丽娟等^[10] 以潮白河为例对华北典型河流径流量驱动力进行了研究,通过相关和回归分析,确定人类活动是导致河流径流量演化的主要驱动因子。孙鹏等^[11] 采用交叉小波变换与小波相干方法对塔里木河径流量变化和影响因素进行了分析,研究表明,在 20 世纪 70 年代阿拉尔径流量主要受降水量影响周期变化,但 20 世纪 90 年代以后,人类活动成为主要因素,降水量的周期变化没有引起径流量的周期变化。本文的研究中,降雨量、年均气温、人口、煤炭产能以及 GDP 都是引起乌兰木伦河径流量变化的因素。在 1986 年以前,乌兰木伦河径流量主要随降雨量进行周期性变化,而 1986 年以后,由于人类活动的加强,径流量受降雨量周期性变化的影响越来越小,社会因素是影响乌兰木伦河的主要驱动因子,这与张思锋^[7] 对于大柳塔矿区乌兰木伦河径流量的衰减因素分析结果相一致。

4.2 结论

(1) 1966—2012 年,随着乌兰木伦河流域内经济

的不断发展和气候条件的影响,乌兰木伦河年径流量呈不断衰减的趋势。径流量的衰减过程主要分为3个阶段:1966—1986年为初期阶段,降雨量为主要影响因素,径流量一直保持在2.5亿 m^3 ;1987—1996年人为因素开始逐渐介入,乌兰木伦河年径流量不断减少,在1.5亿 m^3 左右变化;1997—2012年,人为因素成为主要影响因素,并对径流量的影响程度较强,年径流量仅有0.67亿 m^3 。

(2) 乌兰木伦河径流量的驱动因素主要有降雨量、气温、人口、煤炭产能、GDP等。其中以降雨量和气温为主要内容的自然因素在乌兰木伦河径流量影响因素中的比重为19.6%;而以人口、煤炭产能和GDP为主要内容的社会因素在乌兰木伦河径流量影响因素中的比重为80.4%,是乌兰木伦河径流量衰减的主导因素。

参考文献:

- [1] 黄强,蒋晓辉,刘俊萍,等.二元模式下黄河年径流变化规律研究[J].自然科学进展,2002,12(8):874-877.
- [2] 朱一中,夏军,谈戈.关于水资源承载力理论与方法的研究[J].地理科学进展,2002,21(2):180-188.

- [3] 薛丽芳,谭海樵.沂河流域水文特征变化及其驱动因素[J].地理科学进展,2011,30(11):1354-1360.
- [4] 黄方,张树文,Jan de Leeuw,等.20世纪70年代以来松嫩平原乌裕尔河中下游流域的湿地演变[J].自然资源学报,2006,21(6):949-956.
- [5] 曾庆铭,施龙青.山东省煤炭开采对水资源的影响分析及对策研究[J].山东科技大学学报:自然科学版,2009,28(2):42-46.
- [6] 王波雷,马孝义,范严伟.基于洛伦兹曲线的乌兰木伦河径流变化分析[J].水文,2008,28(5):40-42.
- [7] 张思锋,马策,张立.榆林大柳塔矿区乌兰木伦河径流量衰减的影响因素分析[J].环境科学学报,2011,31(4):889-896.
- [8] 邓飞,全占军,于云江.20年来乌兰木伦河流域植被盖度变化及影响因素[J].水土保持研究,2011,18(3):137-152.
- [9] 杨新,延军平,刘宝元.无定河年径流量变化特征及人为驱动力分析[J].地球科学进展,2005,20(6):637-642.
- [10] 李丽娟,郑红星.华北典型河流年径流演变规律及其驱动力分析:以潮白河为例[J].地理学报,2000,55(3):309-317.
- [11] 孙鹏,张强,白云岗,等.塔里木河流域径流量周期特征及其影响因素[J].地理科学,2013,33(2):216-222.

(上接第33页)

- [2] 李会科,赵政阳,张广军.果园生草的理论与实践:以黄土高原南部苹果园生草实践为例[J].草业科学,2005,22(8):32-36.
- [3] Whitaker M P. Small-scale spatial variability of soil moisture and hydraulic conductivity in a semi-arid rangeland soil in Arizona[D]. Tucson: The University of Arizona, 1993.
- [4] 惠竹梅,李华,周攀,等.行间生草对葡萄园土壤水分含量及贮水量变化的影响[J].草业学报,2011,20(1):62-68.
- [5] 赵政阳,李会科.黄土高原旱地苹果园生草对土壤水分影响[J].园艺学报,2006,33(3):481-484.
- [6] 张扬,赵世伟,侯庆春.草地植被恢复对次降雨土壤水分动态的影响分析[J].水土保持研究,2009,16(3):70-73.
- [7] 邹俊亮,邵明安,龚时慧.不同植被和土壤类型下土壤水分剖面的分异[J].水土保持研究,2011,18(6):12-17.
- [8] 朱德兰,杨涛,王得祥,等.黄土丘陵沟壑区三种不同植被土壤水分动态及蒸散耗水规律研究[J].水土保持研究,2009,16(1):8-16.
- [9] 李国怀,伊华林.生草栽培对柑橘园土壤水分与有效养分及果实产量、品质的影响[J].中国生态农业学报,2005,13(2):161-163.
- [10] Monteiro A, Lopes C M. Influence of cover crop on

water use and performance of vineyard in Mediterranean Portugal[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2007, 121(4): 336-342.

- [11] King A P, Berry A M. Vineyard $\delta^{15}\text{N}$, nitrogen and water status in perennial clover and bunch grass cover crop systems of California's central valley[J]. Agriculture, ecosystems & Environment, 2005, 109(3): 262-272.
- [12] 李会科,张广军.黄土高原旱地苹果园生草对土壤贮水的影响[J].草地学报,2007,15(1):76-81.
- [13] 张先来,李会科.种植不同牧草对渭北苹果园土壤水分影响的初步分析[J].西北林学院学报,2005,20(3):56-59.
- [14] 张露,王益权.干旱季节渭北果园土壤水分时空变化特征[J].干旱地区农业研究,2012,30(1):83-89.
- [15] 王晶,朱清科,刘中奇,等.黄土丘陵区不同林地土壤水分动态变化[J].水土保持研究,2011,18(1):220-223.
- [16] 王韶康.植物的水分利用效率和旱地农业生产[J].干旱地区农业研究,1987,5(2):67-80.
- [17] 张晓红,王惠梅,徐炳成,等.黄土塬区3种豆科牧草对土壤水分的消耗利用研究[J].西北植物学报,2007,27(7):1428-1437.
- [18] 王孟本,李洪建.柠条林蒸腾状况与土壤水分动态研究[J].水土保持通报,1990,10(6):85-90.