

## 黄土高原沟壑区典型小流域水土保持 措施蓄水保土效益分析

朱悦<sup>1</sup>, 姜丽华<sup>2</sup>, 毕华兴<sup>1</sup>, 吴智洋<sup>1</sup>, 云雷<sup>1</sup>, 高路博<sup>1</sup>, 雷娜<sup>1</sup>, 许华森<sup>1</sup>, 鲍彪<sup>1</sup>

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2. 陕西省榆林市林科所, 陕西 榆林 719000)

**摘要:**选择黄土高原沟壑区杨家沟小流域(经过多年人工治理)和董庄沟小流域(未进行治理)两条典型对比流域,通过对两条小流域的土壤容重、孔隙度、土壤肥力、土壤粒径组成、流域径流与输沙模数等指标,旨在揭示两条对比小流域水土保持措施的蓄水保土效益,为水土保持治理提供理论依据。结果表明:杨家沟小流域坡上、坡中、坡下等不同坡位 0—20 cm 的土壤容重平均值分别是董庄沟小流域的 89%, 87%, 96%;在径流模数一定的情况下,杨家沟小流域的输沙系数多年平均值为 1 045 t/km<sup>2</sup>,董庄沟多年平均输沙模数为 4 333.1 t/km<sup>2</sup>,杨家沟小流域输沙模数只相当于董庄沟小流域的 40%左右;杨家沟小流域土壤的速效磷均值为 2.05 mg/kg,董庄沟小流域土壤的速效磷均值为 1.25 mg/kg;在浅层土壤(0—20 cm)中,杨家沟小流域速效钾含量为 399.6 mg/kg,董庄沟小流域为 303.2 mg/kg,比杨家沟低 32%,董庄沟小流域土壤全氮(0.65 g/kg)、有机质(11.19 g/kg)分别比杨家沟土壤全氮(1.05 g/kg)、有机质(16.53 g/kg)低 38%, 15%。

**关键词:**黄土高原沟壑区;小流域;水土保持;效益分析

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2011)05-0119-05

## Benefit Analysis of Soil and Water Conservation Measures in Controlling Soil and Water Loss in Small Watershed of the Loess Plateau Gully Region

ZHU Yue<sup>1</sup>, JIANG Li-hua<sup>2</sup>, BI Hua-xing<sup>1</sup>, WU Zhi-yang<sup>1</sup>,  
YUN Lei<sup>1</sup>, GAO Lu-bo<sup>1</sup>, LEI Na<sup>1</sup>, XU Hua-sen<sup>1</sup>, BAO Biao<sup>1</sup>

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Institute of Forestry Science and Technology, Yulin, Shaanxi 719000, China)

**Abstract:** This paper chose Yangjiagou(manmade) and Dongzhuanggou small watershed (natural) which are two different kinds of small watersheds in gully area of Loess Plateau as research sites, by determining their indices, including soil bulk density, porosity, fertility, particle, runoff and sediment, contrasted effectiveness of soil and water conservation measures in different watersheds, theories supporting can be provided for soil and water conservation management. The results showed that, the averages of soil bulk density in 0—20 cm on upper slope, middle slope, and lower slope of Yangjiagou small watershed are equal to Dongzhuanggou's 89%, 87%, 96%. In certain runoff, the average for many years of Yangjiagou's sediment transport coefficient were 1 045 t/km<sup>2</sup>, then Dongzhuanggou's was 4 333.1 t/km<sup>2</sup>, Yangjiagou's sediment transport coefficient was about Dongzhuanggou's 40%, the average of available phosphorus in soil of Yangjiagou small watershed was 2.05 mg/kg, Dongzhuanggou's was 1.25 mg/kg, in the shallow soil (0—20 cm), available potassium of Yangjiagou small watershed was 399.6 mg/kg, Dongzhuanggou's was just 303.2 mg/kg, equivalent to Yangjiagou's 68%, other index of soil in Dongzhuanggou small watershed, such as total nitrogen, organic matter amounted to Yangjiagou's 62%, 85%.

**Key words:** Loess Plateau gully region; small watershed; soil and water conservation; benefit analysis

收稿日期:2011-03-08

修回日期:2011-05-26

资助项目:国家重点基础研究发展计划"水土流失综合调控原理与治理范式(2007CB407207)

作者简介:朱悦(1985—),女,贵州省铜仁人,在读硕士,从事水土保持研究。E-mail:zhuyue12355@163.com

通信作者:毕华兴(1969—),男,教授,主要从事森林水文和地理信息系统的研究。E-mail:bhx@bjfu.edu.cn

黄土高原是世界上水土流失最为严重的地区之一,水土流失是土地退化的根本原因,也是导致生态环境恶化的重要原因<sup>[1]</sup>。人类活动对森林的破坏,特别是对山区森林的砍伐,破坏了原有坡地的相对稳定,引起了严重的水土流失<sup>[2]</sup>。我国从 20 世纪 50 年代开始研究降雨、地形、土壤这些能对水土流失调控起到重要作用的自然因子对水土流失的影响,并先后大面积推广了以工程措施和生物措施为主的水土流失治理方法,其中主要有退耕还林还草工程、小流域综合治理等。小流域综合治理是指以小流域为单元,在全面规划的基础上,实行预防、治理和开发相结合,形成有效的水土流失综合防护体系,达到防治水土流失、合理利用水土资源、实现生态效益、经济效益和社会效益的协调统一。小流域综合治理是实现农业和农村经济可持续发展,实现社会主义新农村建设的重要组成部分<sup>[3]</sup>。截至 2009 年,中国各级开展重点治理的小流域达 7 000 多条,总面积 20 多万 km<sup>2</sup>。小流域治理已初见成效,近年来研究小流域治理措施的效益较多,其中党志良等<sup>[4]</sup>对陕西省丹凤县商榷项目区陈家沟流域实施水土保持工程效益分析表明小流域治理的综合效益巨大。罗雷等<sup>[5]</sup>对甘肃省 1996—2005 年水土保持的农村社会经济效益进行了评估计算表明,甘肃省水土保持工作以较小的投入换取了较大的农村社会经济效益,农村社会经济发展与水土保持发展态势良好。陈鹏飞等<sup>[6]</sup>对甘肃省东沟、西沟流域对比研究发现沟壑综合整治对流域的径流产流有显著的减少作用。但是这些研究主要集中在对水土保持治理的综合效益分析,且对比研究较少。本文选取黄土高塬沟壑区具有典型代表性的杨家沟小流域(治理流域)和董庄沟小流域(对照)进行比较分析,研

究水土保持综合治理措施的蓄水保土效益,为今后黄土高原小流域治理提供一定的理论依据和数据支持。

## 1 研究区概况

杨家沟小流域(35°42′N,107°33′E)和董庄沟小流域(35°42′N,107°32′E)位于甘肃省庆阳市西峰区后官寨乡境内,是黄土高塬沟壑区南小河流域内的两条小支沟,两沟位置毗邻。杨家沟小流域和董庄沟小流域地貌主要有塬面、梁茂坡和沟谷,为典型的黄土高塬沟壑区地貌特征。两流域地质构造较单一,均为第四纪黄土覆盖,总厚度约 250 m。两小流域塬面均为农业生产基地,除村庄、道路旁和部分沟头有小型林带外,无整块大片林带,林草植被主要生长于坡面和沟谷中。杨家沟小流域和董庄沟小流域基本情况对照见表 1。根据西峰气象站 1937—2004 年降雨资料统计分析,研究区多年平均降水量 546.9 mm,年最大降雨量 828.2 mm(2003 年),年最小降雨量 309.7 mm(1942 年),年平均气温 9.3℃,最高气温 39.6℃,最低温度-22.6℃,最大日温差 23.7℃,无霜期 155 d,蒸发量 1 474.6 mm,干燥度 1.6。

表 1 研究区基本情况对照

基本情况	杨家沟小流域	董庄沟小流域
流域面积/km <sup>2</sup>	0.87	1.15
各地貌类型面积比	塬面 34.5%, 坡面 23.9%, 沟谷面积 41.6%	塬面 33%, 坡面 27.4%, 沟谷面积 39.6%
沟长/m	1500	1600
沟壑密度/(km·km <sup>-2</sup> )	2.95	
沟道比降/%	10.67	8.93
平均宽度/m	580	720

表 2 人工治理小流域(杨家沟)水土保持措施数量统计

措施名称	沟边埂	沟头防护	地边埂	涝池	水窖	梯田埂	水平梯田	水平条田
措施数量	4585 m	1 个	1273 m	5 口	13 口	3600 m	5.2 hm <sup>2</sup>	25.33 hm <sup>2</sup>
措施名称	水平沟	沟壑造林	树穴加水平沟	鱼鳞坑	沟壑种草	土谷坊	小型淤地坝	
措施数量	24715 m	45.07 hm <sup>2</sup>	5.5 hm <sup>2</sup>	2.27 hm <sup>2</sup>	13.27 hm <sup>2</sup>	143 道	6 座	

杨家沟小流域自 1952 年开始治理,基本上是按照“全面规划,集中治理,连续治理,沟坡兼治,治坡为主”及“工程措施与生物措施相结合”的治理方针,主要措施量见表 2,其采取的主要水土保持措施有:(1)在塬面修地埂 1 273 m;田间道路两边造林 1.76 万株,修沟边埂 4 585 m,沟头防护 1 处;(2)在山坡造杏林为主,修水平沟、水平阶 2.64 万 m,造林 8.93 hm<sup>2</sup>;坡耕地修地埂 4 643 m,逐年修成水平梯田 5.2 hm<sup>2</sup>,人工牧草地 1.3 hm<sup>2</sup>,其他林间草地和非生产用地 8.07 hm<sup>2</sup>。(3)在沟底每隔 20~30 m 打一道柳谷

坊,谷坊间营造以杨柳为主的沟底防冲林,在两岸的塌积土上栽植生长迅速的刺槐,坡度大的红土泻溜面上栽植沙棘,沟谷台地种植苜蓿建立人工割草场。支毛沟修谷坊 75 道,栽植杨柳 1.1 万株,沟道造林 22.07 hm<sup>2</sup>,修水平梯田 0.41 hm<sup>2</sup>,种草 6.13 hm<sup>2</sup>,天然草地 7.19 hm<sup>2</sup><sup>[7]</sup>。杨家沟小流域人工栽培的乔木树种主要有侧柏(*Platycladus orientalis*)、油松(*Pinus tabulaeformis* Carr)、山杏(*Prunus armeniaca* var. *ansu*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia* L)、山杨(*Populus davidiana*)、旱柳(*Salix matsudana*)等,

灌木主要有紫穗槐 (*Acanthoscelides pallidipennis* Motschulsky)、柠条 (*Caragana korshinskii* Kom)、沙棘 (*Hippophae rhamnoides* Linn) 等,杨家沟小流域内经过多年的水土保持综合治理,现已形成以刺槐、侧柏、油松、山杏、沙棘等为主的人工植物群落。塬面、坡面的主要农作物为小麦、谷子、玉米、高粱、马铃薯、豆类等。董庄沟小流域的植被与杨家沟小流域治理前的植被相似,处于群众利用的自然状态,植被以马牙草 (*Arundinella anomala* Stend.)、冰草 (*Agropyron cristatum*)、艾蒿 (*Artemisia argyi*) 等天然群落为主。

2 研究方法

本文通过测定两个小流域土壤容重、土壤粒径组成、土壤养分、观测流域径流和计算土壤孔隙度、泥沙模数、输沙模数等,以对比分析治理小流域水土保持效益。

2.1 土壤容重测定方法

在杨家沟小流域、董庄沟小流域坡下、坡中、坡上各选择 1 块 10 m×10 m 的大样方,在大样方内按 S 型布设 5 个取样点,用 100 cm<sup>3</sup> 环刀取表层 (0—20 cm) 土壤,称湿重,再烘干至恒重,取平均值进行比较分析,按如下公式分析土壤容重。

$$R_s = 100G/[V(100+W)]$$

式中:  $R_s$ ——土壤容重 (g/cm<sup>3</sup>);  $G$ ——湿土重 (g);  $V$ ——环刀容积 (cm<sup>3</sup>);  $W$ ——样品含水量 (g)。

2.2 土壤孔隙度、颗粒组成测定方法

按经验公式计算土壤孔隙度 ( $P_t$ )<sup>[7-8]</sup>。其计算公式为:  $P_t = 93.947 - 32.995R_s$

土壤颗粒组成用比重计法测定。

2.3 土壤养分测定方法

样方选取同土壤容重测定,每个样方以 S 形从右上角到左下角依次布设 5 个点,分别用土钻取土层 0—20, 20—60, 60—100 cm 土,实验室测 0—20, 0—100 cm 土壤养分。其中土壤全氮采用重铬酸钾—硫酸消化法;速效钾含量采用火焰光度法;有机质含量采用重铬酸钾法;速效磷含量采用碳酸氢钠法<sup>[9]</sup>。

2.4 径流泥沙的测定

西峰水土保持试验站自 1954 年来先后在南小河沟流域布设 17 个雨量站,各测站的资料系列多为汛期资料且观测时段不连续,本研究的水文资料为 1954—1977 年杨家沟小流域和董庄沟小流域的径流泥沙以及降水量,由西峰水土保持科学试验站实地观测得到。

本文数据分析处理及图表处理均用 Excel 2010 软件完成。

3 结果分析

3.1 土壤物理性质的差异

(1)土壤容重及孔隙度。土壤容重及孔隙度是土壤的基本物理性质。对土壤的透气性、入渗性能、持水能力、溶质迁移特征以及土壤的抗侵蚀能力都有非常大的影响<sup>[9]</sup>。有研究表明,土壤容重及土壤孔隙度与产流产沙有较大相关性,土壤容重增大,土壤孔隙度减少,初始产流时间提早,径流系数增大,土壤流失量增多。土壤容重综合反映了土壤固体颗粒和土壤孔隙的状况,土壤容重小,表明土壤比较疏松,孔隙多,保水效果好,反之,土粒密度大,表明土体比较紧实,结构性差,孔隙少,保水效果差<sup>[10-15]</sup>。

从表 3 可以看出,总体上杨家沟小流域的土壤容重比董庄沟小流域的土壤容重要小,杨家沟小流域坡下、坡中、坡上 0—20 cm 的土壤容重平均值分别为 1.05, 0.95, 1.02 g/cm<sup>3</sup>;董庄沟小流域坡下、坡中、坡上的土壤容重分别为 1.17, 1.09, 1.05 g/cm<sup>3</sup>。

表 3 2009 年两个小流域土壤容重对比 g/cm<sup>3</sup>

取土点	董庄沟小流域			杨家沟小流域		
	坡下	坡中	坡上	坡下	坡中	坡上
1	1.11	1.24	1.06	1.10	0.82	1.00
2	1.15	1.21	1.10	1.04	0.99	1.04
3	1.13	1.11	0.98	1.03	0.90	1.02
4	1.19	0.97	1.02	0.99	1.01	0.94
5	1.25	0.94	1.07	1.10	1.03	1.08
平均值	1.17	1.09	1.05	1.05	0.95	1.02

从表 4 可以看出杨家沟小流域坡上、坡中、坡下的土壤总孔隙度平均值分别为 60.36%, 62.57%, 59.22%,董庄沟小流域坡上、坡中、坡下的土壤总孔隙度平均值分别为 59.42%, 57.89%, 55.45%,杨家沟小流域的土壤总孔隙度大于董庄沟小流域。这主要是由于杨家沟小流域进行过人工林营造工作,植被覆盖度高,林分密度较大,植被地下根系繁茂,对表层土壤起到一定的疏松作用,致使土壤的容重较低,总孔隙度增大。另外,多年来原地表产生的枯枝落叶,分解形成腐殖质,对土壤的物理性质也有一定的改善作用。孔隙度与土壤容重有一定负相关关系,董庄沟小流域的孔隙度比杨家沟要小,反映出董庄沟小流域土壤疏松情况欠佳。

(2)土壤养分及差异分析。剧烈的水土流失导致土壤养分的流失,从而导致土地生产力的下降。根据对杨家沟和董庄沟小流域的土壤养分化验,结果见表 5,董庄沟小流域表层 (0—20 cm) 土壤养分流失严重,土壤全氮含量比杨家沟低 38%,速效磷含量不足杨

家沟小流域的 50%，速效钾含量比杨家沟低 32%，有机质含量比杨家沟低 15%。这在一定程度上反映了没有采取水土保持措施的小流域水土流失带走了表层土壤大量养分及有机质使土壤肥力下降。土壤有机质与土壤质量和农业生产密切相关，土壤侵蚀、土壤结构破坏、有机质的矿化和氧化使土壤有机碳含量降低<sup>[16]</sup>。0—100 cm 土壤中两小流域土壤养分含量差距不大。

表 4 2009 年 2 个小流域土壤总孔隙度对比 %

取土点	董庄沟小流域			杨家沟小流域		
	坡下	坡中	坡上	坡下	坡中	坡上
1	57.24	53.19	59.00	57.69	66.93	60.89
2	56.05	54.17	57.70	59.52	61.19	59.49
3	56.51	57.48	61.51	59.88	64.23	60.43
4	54.84	61.85	60.23	61.25	60.52	62.83
5	52.60	62.78	58.64	57.74	59.96	58.19
平均值	55.45	57.89	59.42	59.22	62.57	60.36

表 5 土壤养分情况

小流域	土壤层次/cm	全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )	有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	速效钾/(mg·kg <sup>-1</sup> )	速效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )
杨家沟	0—20	1.05	16.53	399.60	2.26
	0—100	0.61	9.68	284.63	2.05
董庄沟	0—20	0.76	14.39	303.20	1.03
	0—100	0.65	11.19	269.52	1.26

(3)土壤粒径组成差异分析。分析两小流域 0—100 cm 土壤机械组成,发现两小流域土壤粒径组成在相同坡位上存在差异(见图 1),经过人工治理后的杨家沟小流域在流域坡下、坡中和坡上位置,土壤粒径相对较小(小于 0.02 mm),颗粒组成所占比例比未治理的董庄沟大。其中坡下 0—20,20—60,60—100

cm 土壤中治理流域比未治理流域小于 0.02 mm 的土壤粒径组成质量百分比分别大 5.9%,11.6%,9.4%;坡中分别大 10.3%,4.7%,10.2%、坡上分别为 6.3%,0.4%。两流域土壤机械组成上的差异主要是由于未治理小流域更多的水土流失中,流失的泥沙带走了土壤中更多的细小颗粒,影响土壤粒径组成。

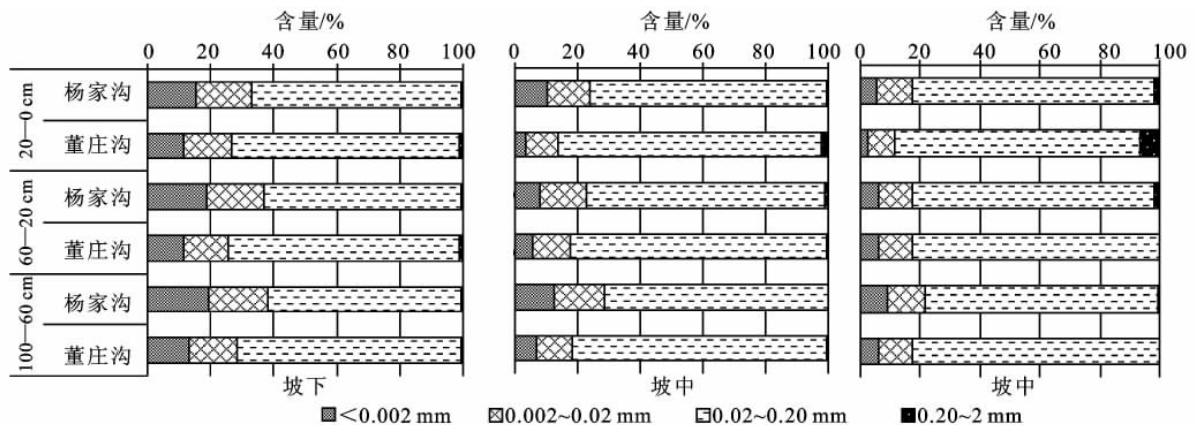


图 1 两小流域土壤粒径组成分布

### 3.2 流域水文差异

为了进一步量化研究采用工程和植物措施的杨家沟流域和未采用任何措施的董庄沟流域的水土保持效益情况,在收集了西峰水土保持试验站 1954—1977 年杨家沟小流域和董家沟小流域的降雨量、径流模数和输沙模数后,对相关数据进行了分析。

由图 2 可以看出,两小流域径流模数趋势基本一致,均在 1956 年达到了最大值。杨家沟小流域和董庄沟小流域尽管同为南小河沟流域的子流域,地理位置接近,降雨量基本一致,径流模数差异却较大,董庄沟小流域的径流模数在部分年份达到了杨家沟流域的 30 倍。由图 3 可以看出,两流域的输沙模数随径流模数的变化成正相关,径流模数基本决定输沙模数的变化。但是,在径流高位运行的情况下,没有经

过人工治理的董庄沟小流域输沙模数偏高,平均是杨家沟输沙模数的 157%,且董庄沟流域输沙模数曲线波动较大,而杨家沟流域输沙模数曲线较平缓。径流模数及输沙模数等水文数据直接反映水土流失情况,从分析可见不进行水土流失防护工作的小流域蓄水保土效益较治理小流域差。

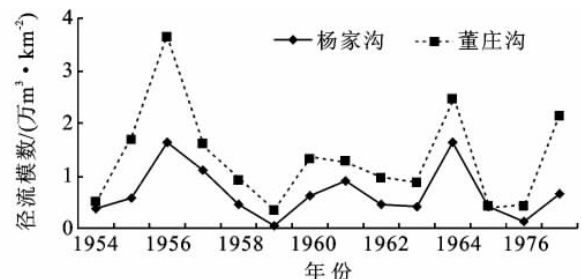


图 2 小流域径流模数对比

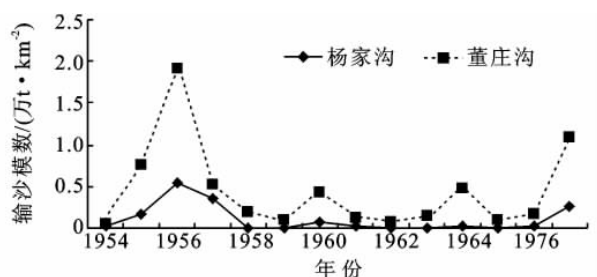


图3 小流域输沙模数对比

## 4 结论

(1)对甘肃省庆阳市西峰区杨家沟小流域和董庄沟两个对比小流域的实测土壤孔隙度、径流、泥沙等资料分析可见,经过人工治理后的杨家沟小流域,土壤孔隙度、土壤容重均优于未经人工治理的董庄沟。在相同降雨条件下,两小流域的径流模数、输沙模数变化趋势基本一致,董庄沟小流域的径流模数均比杨家沟小流域大,部分年限达到了其30倍,在径流模数一定的情况下,从有观测资料以来董庄沟小流域输沙模数均比杨家沟流域大,大量的水土流失带走了董庄沟更多土壤养分,其土壤速效磷含量不及杨家沟小流域的50%,其它土壤养分均比杨家沟低15%~38%。

(2)在黄土高原沟壑区以水土保持工程措施、植物措施相结合的水土流失治理方法比单纯的依靠自然生态修复有更大的蓄水保土效益。水土流失作为一个多因素形成的结果,很难依靠自然修复完全实现水土保持效益,工程措施、植物措施等多手段治理方法是黄土高原水土流失治理、小流域生态修复取得最大蓄水保土效益的必然选择。

(3)文章主要探讨水土保持措施的蓄水保土效益,在以后的研究中还可以增加经济投入等多方面因素对比分析水土保持的综合效益。

### 参考文献:

- [1] 于静洁,刘昌明.森林水文研究综述[J].地理研究,1989,8(1):88-98.
- [2] 孟庆枚.黄土高原水土保持[M].郑州:黄河水利出版社,1996.
- [3] 王立明,虎维军.浅谈小流域综合治理与新农村建设[J].中国水土保持,2010(8):35-36.
- [4] 党志良,林启才,史淑娟.水土保持综合治理效益分析与评价:以丹凤县陈家沟小流域为例[J].西北大学学报:自然科学版,2010,40(6):537-539.
- [5] 罗雷,张济世.甘肃省水土保持的农村社会经济效益评价与分析[J].中国水土保持,2009(9):13-14.
- [6] 陈鹏飞,陈丽华,余新晓,等.沟壑综合整治对小流域水沙的影响[J].水土保持研究,2010,17(4):100-104.
- [7] 田杏芳,贾泽祥,刘斌,等.黄土高原沟壑区典型小流域水土流失规律及水土保持治理效益分析研究[M].郑州:黄河水利出版社,2008.
- [8] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科学技术出版社,1978.
- [9] 陈攀攀,毕华兴,陈智汉,等.50年来黄土高原沟壑区典型小流域土地利用动态变化及其驱动力分析[J].中国水土保持科学,2010,8(1):71-76.
- [10] 郑纪勇,邵明安,张兴昌.黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征[J].水土保持学报,2004,18(3):53-56.
- [11] 陈攀攀.黄土高原沟壑区典型小流域土地利用格局变化对水土流失的影响研究[D].北京:北京林业大学,2010.
- [12] 刘鹏涛,冯佰利,慕芳,等.保护性耕作对黄土高原春玉米田土壤理化特性的影响[J].干旱地区农业研究,2009,27(4):171-175.
- [13] 聂小军,张建辉,刘刚才,等.金沙江干热河谷侵蚀陡坡植被恢复对土壤质量的影响[J].生态环境,2008,17(4):1636-1640.
- [14] 汪永英.新民林场不同森林类型土壤持水能力的分析[J].农机化研究,2007(5):80-82.
- [15] 王辉,王全九,邵明安.表层土壤容重对黄土坡面养分随径流迁移的影响[J].水土保持学报,2007,21(3):10-14.
- [16] 张玉斌,曹宁,苏晓光,等.吉林省低山丘陵区水土保持措施对土壤性质的影响[J].水土保持通报,2009,29(5):226-227.

(上接第118页)

- [19] 陈遐林.华北主要森林类型的碳汇功能研究[D].北京:北京林业大学,2003.
- [20] 马钦彦,陈遐林,王娟,等.华北主要森林类型建群种的含碳率分析[J].北京林业大学学报,2002,24(5/6):100-104.
- [21] Tian H, Chen G, Liu M, et al. Model estimates of net primary productivity, evapotranspiration, and water use efficiency in the terrestrial ecosystems of the southern United States during 1895-2007[J]. Forest Ecology and Management, 2010, 259(7):1311-1327.
- [22] Forrester D I, Theiveyanathan S, Collopy J J, et al. Enhanced water use efficiency in a mixed *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii* plantation[J]. Forest Ecology and Management, 2010, 259(9):1761-1770.