

东辽河流域未来土地利用变化对水文影响的研究

孙丽娜^{1,2}, 梁冬梅²

(1. 吉林省汇众益环科技开发公司, 长春 130012; 2. 吉林省环境科学研究院, 长春 130012)

摘 要:土地利用变化对水文的影响已引起社会的广泛关注。以东辽河流域为研究对象,以分布式水文模型 SWAT 和土地利用变化模型 CLUE-S 为研究工具,通过将 SWAT 与 CLUE-S 模型耦合,定量评估了东辽河流域未来 2 种不同情景模式下的土地利用变化对流域水文过程长期的影响。研究结果表明:2016—2025 年情景 1 的平均径流量为 $15.41 \text{ m}^3/\text{s}$,2016—2025 年情景 2 的平均径流量为 $13.8 \text{ m}^3/\text{s}$,2025 年情景 2 的土地利用变化比情景 1 的土地利用变化更有利于减少径流的流失;通过对比分析 2000—2025 年不同情景模式下土地利用变化的植被覆盖率变化,2000 年植被覆盖率由 77.51% 变化到 2025 年情景 1 的 77.23% 和 2025 年情景 2 的 78.93%,表明植被覆盖率与径流的流失量呈反比。因此,研究区未来土地利用变化应按照国家土地利用规划实行,对东辽河流域水资源规划及可持续发展具有重要的意义。

关键词:SWAT 模型; CLUE-S 模型; 土地利用变化; 东辽河流域

中图分类号:F301.2; P333

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)05-0164-05

Effect of Future Land Use Change on Hydrology in Dongliaohe Basin

SUN Lina^{1,2}, LIANG Dongmei²

(1. Jilin Huizhongyihuan Technology Development Company, Changchun 130012, China; 2. Jilin Research Academy of Environment Sciences, Changchun 130012, China)

Abstract: The influence of land use change on hydrology has obtained the extensive concern of society. Dongliaohe Basin was chosen as the case study area. Used distributed watershed hydrological model SWAT (Soil and Water Assessment Tool) and CLUE-S model, we modeled the hydrological response to different land-use change scenarios through coupling the models for SWAT and CLUE-S. The result shows that the runoff in scenario 1 from 2016 to 2025 will be $15.41 \text{ m}^3/\text{s}$ and the runoff in scenario 2 from 2016 to 2025 will be $13.80 \text{ m}^3/\text{s}$, the result shows that the land use change in scenario 2 will be better for runoff reduction; through comparisons of land use change of vegetation coverage from 2000 to 2025, the vegetation coverage will change from 77.51% to 77.23% from 2000 to the scenario 1 of 2025, and the vegetation coverage will change from 77.51% to 78.93% from 2000 to the scenario 2 of 2025, which shows that the vegetation coverage has the negative relationship with runoff. Therefore, the future land use change in the study area should be in accordance with the national land use planning, the Dongliaohe Basin resources planning and sustainable development have the vital significance.

Keywords: SWAT model; CLUE-S model; land use change; Dongliaohe Basin

随着我国经济的快速发展,水资源的脆弱性已成为流域水环境污染的主要因素之一。不适当的土地利用方式及土地利用活动直接导致了土壤侵蚀及氮磷营养物随地表径流流失,从而对流域水体环境产生影响,致使水资源供需关系发生了变化,进而对流域

的生态环境及社会经济可持续发展等方向产生了巨大的影响。因此,合理分析及改变土地利用变化情况对流域水环境改善及水文影响的研究显得尤为重要。

近年来,国内外学者在土地利用/土地覆被变化、驱动力方面以及应用分布式水文模型模拟研究区的

水文特征等方面的研究较多。农宇等^[1]利用多分类 Logistic 回归对湖北省嘉鱼县土地利用变化进行模拟;谢花林^[2-3]、曾凌云^[4]等应用 GIS 和 Logistic 回归模型对土地利用变化及驱动力分析进行了研究;Fox^[5]等利用 CLUE-S 模型对东南亚大陆土地利用变化进行模拟;Santini^[6]等利用土地变化模型对意大利的土地变化进行预测;Yu^[7]、Neitsch^[8]等采用分布式模型研究台湾地区的径流量。然而,国内外学者在土地利用变化对水文影响的研究方面比较少,尤其是将 SWAT (the Semi-distributed Soil and Water Assessment Tool)模型与 CLUE-S(the Conversion of Land Use and its Effects at Small Regional Extent)模型耦合,预测未来不同情景模式下土地利用变化对水文影响方面的研究在国内外已有的文献中鲜有报道。

本研究以东辽河流域为研究区,由于自然因素及人类活动的影响,东辽河流域内水质及水资源每况愈下,对流域水环境管理造成了很大的威胁。因此,本文在分析多年间东辽河流域土地利用变化趋势的基础之上,应用 CLUE-S 模型模拟研究区未来土地利用变化情景,探讨未来土地利用变化对流域水文影响的研究,旨在为东辽河流域的土地利用规划及水资源可持续利用方面提供指导。

1 研究区概况

东辽河是辽河的主要支流,发源于吉林省东辽县辽河源镇,自东向西流经辽源市区、东辽县大部分乡镇后,在东辽县云顶镇注入二龙山水库。后流经梨树县、公主岭市、双辽市后流入辽宁省境内。地形特点是自东向西将辽河分为山地、丘陵和平原。流域内四季分明,春季干旱多风,夏季温度多雨,多年平均降雨量为 545 mm,主要集中在 6—8 月,降雨量约占年降水量 50%以上;多年平均蒸发量为 1 020 mm,属于东部季风区中温带半湿润大陆气候。东辽河流域是吉林省重要的商品粮基地,年均产供水量中,农业供水量约占 85%。

2 研究方法与数据分析

2.1 研究方法

本文首先收集东辽河流域相关资料,校准和验证 SWAT 模型在研究区的适用性。然后基于 3S 技术将 2000 年和 2005 年两期的土地利用图生成分辨率为 250 m×250 m 的 GRID 形式,利用 GIS 空间分析功能得出研究区土地利用变化的空间与属性数据,通过 CLUE-S 模型模拟研究区 2005 年土地利用图,校准和验证 CLUE-S 模型在研究区的适用性,从而通

过建立的未来土地利用图输入到 SWAT 模型中,定量分析东辽河流域未来土地利用变化对水文的影响。

2.1.1 SWAT 模型

SWAT 模型是由 Arnold 等^[9]于 1994 年吸取了 CREAMS, GLEAMS, EPIC 等模型的优点为美国农业部(USDA)农业研究中心(ARS)开发的一个具有很强物理机制、长时段的流域分布式水文模型。该模型是以日为时间步长,通过按不同的土地利用、土壤类型和高程江流域划分为若干水文响应单元(HRUs),可以在多种土壤、土地利用和管理条件下的复杂流域,利用 3S 技术的空间信息,模拟、预报复杂流域的多种不同的水文物理过程,很大程度上提高了模型模拟精度^[10-11]。SWAT 模型作为一种具有代表性的分布式水文模型,近几年来得到迅速的发展,主要用于对各种管理措施及气候条件下水资源供给的模拟及预测等。此外,该模型也广泛用于土地利用变化下的水文响应研究,该研究对水资源规划、管理及维持具有重要的意义。

2.1.2 CLUE-S 模型

CLUE-S 模型是由荷兰瓦赫宁根大学 Verburg 等^[12]科学家在其较早的 CLUE 模型基础上为小尺度研究区开发的。该模型综合分析了研究区土地利用空间分布概率、研究区初期土地利用现状图、土地利用变化规律,在对研究区土地利用变化的经验理解基础之上,通过定量分析土地利用变化与社会、经济、技术及自然环境等驱动因子之间的关系来模拟多种土地利用变化,进行不同情景模式下的土地利用变化模拟,进而对未来土地利用变化进行预测^[13]。

2.2 数据收集

2.2.1 SWAT 模型数据

(1) 空间数据源。主要包括 DEM、研究区 1:10 万 2000 年和 2005 的土地利用图、1:100 万的 2000 年土壤类型分布图。

(2) 属性数据。主要包括集水域内 1989—2009 年间流域内 4 个雨量站日降雨数据、日径流数据、日最高最低气温数据和相对湿度等气象资料。

2.2.2 CLUE-S 模型数据

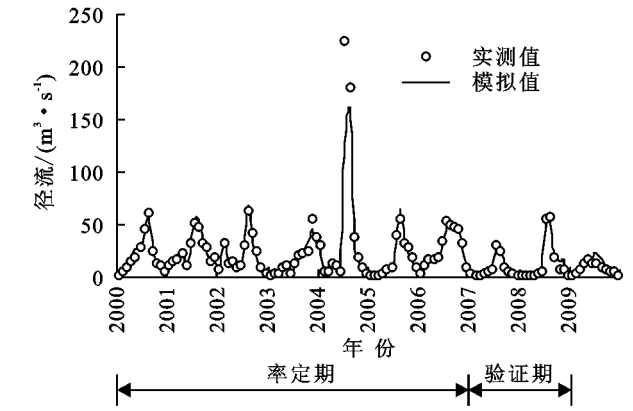
根据研究区 2000 年、2005 年的土地利用图,在 GIS 软件支持下分别将土地利用现状图作栅格化处理,栅格大小为 250 m×250 m,结合研究区土地利用特点,将上述栅格图重新分为 7 大类:水田、旱地、林地、草地、水域、城镇、其他。利用 GIS 空间分析模块分别生成居民点、道路、河流的距离分析图层。

3 结果与分析

3.1 SWAT 模型参数的率定和验证

应用 SWAT 模型建立研究区数据库,选取 2000—2007 年的实测月平均流量、泥沙对 SWAT 模

型进行参数率定,2008—2009 年的实测资料对模型进行验证。选用确定性系数(R^2)、 E_{ns} ^[14]来评价水文模型的适用性,模型参数率定和验证的精度统计见表 1,图 1 给出流域率定期及验证期径流和泥沙的模拟过程与实测过程。结果表明, $R^2>0.5$, $E_{ns}>0.5$,SWAT 模型模拟精度较高,在东辽河流域具有较好的适用性,可用于分析东辽河流域土地利用变化对水



文过程的影响研究。

表 1 率定期、验证期各指标的 R^2 与 E_{ns} 值			
参数		径流	泥沙
率定期	R^2	0.82	0.85
	E_{ns}	0.79	0.85
验证期	R^2	0.87	0.87
	E_{ns}	0.87	0.86

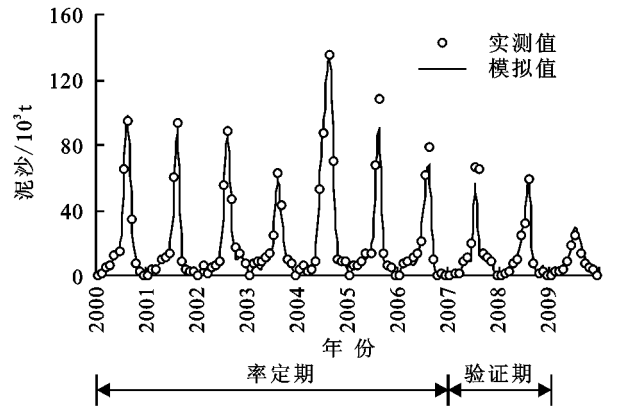


图 1 率定期、验证期径流、泥沙实测值与模拟值的对比

3.2 CLUE-S 模型参数的率定和验证

根据研究区 2000 年的土地利用图,通过 CLUE-S 模型模拟出 2005 年土地利用图(图 2)。通过 2005 年土地利用图的实测图与 2005 年模拟图对比分析可知 CLUE-S 模型模拟的精度。该模型采用 Kappa 指数评价模型的模拟精度^[15],公式为:

$$Kappa=(P_a-P_c)/(P_b-P_c) \tag{1}$$

式中: P_a 为正确模拟的比例; P_c 为随机情况下期望的正确模拟比例; P_b 为理想分类情况下正确模拟比例; $Kappa$ 值越接近 1,模型模拟精度越高。由图 2 可知,模型模拟的正确栅格数为 136 297,占总栅格数的 85.26%。本文将土地利用类型划分为 7 类,所以 P_c 为 1/7,由此可知 $Kappa$ 指数为 0.828 0。结果表明,CLUE-S 模型可用于预测东辽河流域未来土地利用变化情况。

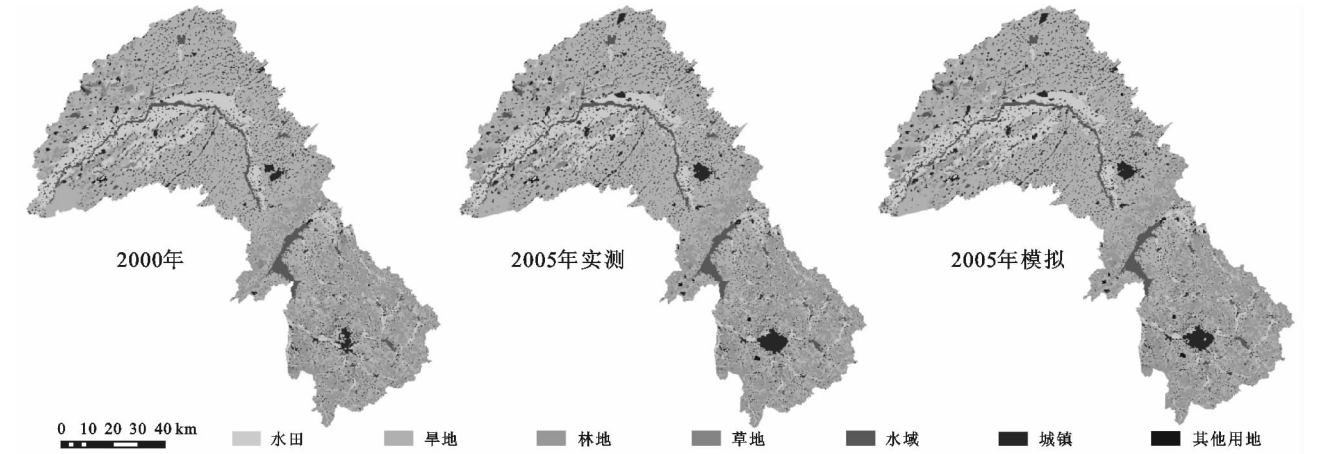


图 2 东辽河流域 2000 年、2005 年(实测、模拟)土地利用类型

3.3 未来情景设置

本文基于东辽河流域土地利用变化发展的历史趋势及未来土地利用总体规划,基于 CLUE-S 模型构建了两种土地利用变化情景,并预测东辽河流域 2025 年不同情境模式下的土地利用变化情况。

(1) 历史趋势发展情景。根据研究区 2000—2005 年土地利用变化转移概率矩阵和 2005 年土地利用类型所占面积百分比,利用统计分析法预测东辽

河流域 2025 年按历史趋势发展的土地利用图。

(2) 土地利用总体规划情景。研究区各类土地利用面积发展趋势将根据《吉林省土地利用总体规划》(2006—2020 年)变化。基于 2005 年研究区土地利用数据,结合前面 CLUE-S 模型参数设置,分别对 2025 年 2 种情景下的土地利用图进行模拟,结果见图 3。研究区 2000—2025 年的各土地利用类型面积变化见图 4。

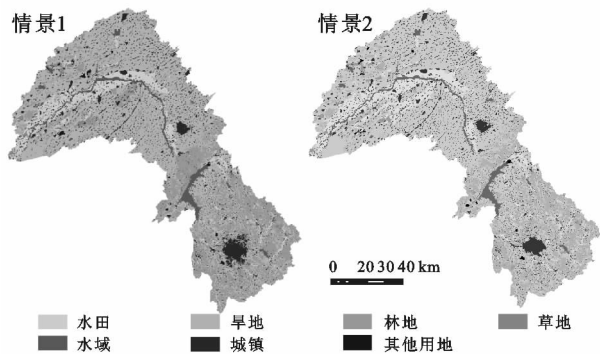


图 3 不同情况下 2025 年土地利用变化

3.4 东辽河流域未来土地利用变化对水文的影响研究

为了定量分析未来土地利用变化对径流等水文要素的长期影响,本文将采取固定的水文资料及气候因子的方法,即运用 1990—2009 年东辽河流域的水文资料、1990—2009 年 20 a 的气象站资料,运用 SWAT 已经验证好的模型参数,将 CLUE-S 模型模拟的未来不同情景下的土地利用图输入 SWAT 模型,对 2025 年情景 1 及 2025 年情景 2 的不同情景模式下的土地利

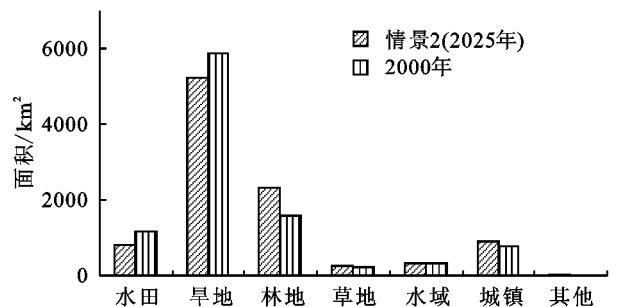
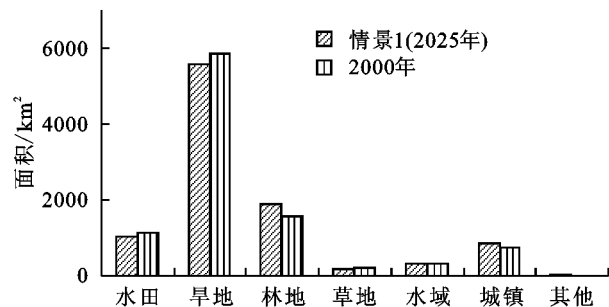


图 4 研究区 2000—2025 年不同情景模式下各土地利用类型面积变化

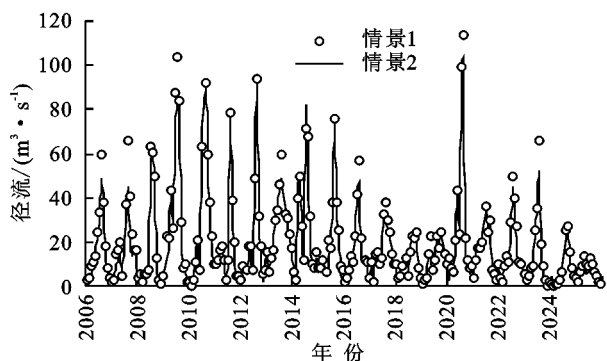


图 5 不同情境模式下径流对比分析

4 结论

将分布式水文模型 SWAT 应用于东辽河流域,选取 2000—2007 年的实测月平均流量、泥沙对 SWAT 模型进行参数率定,2008—2009 年的实测资料对模型进行验证,选用确定性系数 R^2 和 E_{ns} 评价模型的适用性,研究结果表明 R^2 和 E_{ns} 均大于 0.5,证明 SWAT 模型模拟精度较高,适用于研究区水文模拟研究。

依据研究区 2000 年土地利用图,通过 CLUE-S

用变化下的水文响应进行研究。模拟结果见图 5。由实测数据我们可知 2000—2009 年的平均径流量为 $20.98 \text{ m}^3/\text{s}$,由图 5 模拟结果可知,2016—2025 年情景 1 的平均径流量为 $15.41 \text{ m}^3/\text{s}$,2000—2009 年的平均径流量减少了 $5.57 \text{ m}^3/\text{s}$;2016—2025 年情景 2 的平均径流量为 $13.8 \text{ m}^3/\text{s}$,比 2000—2009 年的平均径流量减少了 $7.18 \text{ m}^3/\text{s}$ 。由此可知,相同的气象条件(均用 1990—2009 年的气象资料)不同的土地利用图所导致的东辽河流域的地表径流变化也较大,情景 2 的土地利用变化比情景 1 的土地利用变化更有利于减少径流的流失。由图 4 可知,2000—2025 年情景 1、2025 年情景 2 的土地利用面积变化较大,植被覆盖率由 2000 年的 77.51%变化到 2025 年情景 1 的 77.23%和 2025 年情景 2 的 78.93%。由此可知,植被覆盖可以很好地减少地表径流。因此,未来研究区的土地利用变化应按照国家土地利用规划实行,使东辽河流域的土地利用演化趋于合理,从而有利于东辽河流域水资源规划及可持续发展。

模型模拟出 2005 年土地利用图与 2005 年实测图对比分析可知,CLUE-S 模型模拟的精度适用于研究区土地利用模拟研究。基于东辽河流域土地利用变化发展的历史趋势及未来土地利用总体规划,借助 CLUE-S 模型构建了东辽河流域 2025 年不同情境模式下的土地利用变化情况。

通过将 SWAT 与 CLUE-S 模型耦合,预测了研究区 2025 年不同情境模式下土地利用变化对水文的响应。2016—2025 年情景 1 的平均径流量为 $15.41 \text{ m}^3/\text{s}$,2016—2025 年情景 2 的平均径流量为 $13.8 \text{ m}^3/\text{s}$,2025 年情景 2 的土地利用变化比情景 1 的土地利用变化更有利于减少径流的流失;通过对比分析 2000 年到 2025 年不同情景模式下土地利用变化的植被覆盖率变化,2000 年植被覆盖率由 77.51%变化到 2025 年情景 1 的 77.23%和 2025 年情景 2 的 78.93%,表明植被覆盖率与径流的流失量呈反比。研究区未来土地利用变化按照国家土地利用规划实行,对东辽河流域水资源规划及可持续发展具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 农宇,王坤,杜清运. 利用对分类 Logistic 回归进行土地利用变化模拟:以湖北省嘉鱼县为例[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2011,36(6):743-746.
- [2] 谢花林. 典型农牧交错区土地利用变化驱动力分析[J]. 农业工程学报,2008,24(10):56-62.
- [3] 谢花林. 基于 Logistic 回归模型的区域生态用地演变影响因素分析:以京津冀地区为例[J]. 资源科学,2011,33(11):2063-2070.
- [4] 曾凌云,王钧,王红亚. 基于 GIS 和 Logistic 回归模型的北京山区耕地变化分析与模拟[J]. 北京大学学报:自然科学版,2009,45(1):165-170.
- [5] Fox J, Vogler J B, Sen O L, et al. Simulating land-cover change in montane mainland southeast Asia[J]. Environmental Management, 2012,49(5):968-979.
- [6] Santini M, Valentini R. Predicting hot-spots of land use changes in Italy by ensemble forecasting[J]. Regional Environmental Change, 2011,11(3):483-502.
- [7] Yu P S, Wang Y C, Kuo C C. Effects of land-use change on runoff response in the ungauged Ta-Chou basin, Taiwan [J]. International Association of Hydrological Sciences, Publication, 2003(279):162-170.
- [8] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and water assessment tool user's manual version 2000[Z]. Texas: Texas Water Resources Institute, College Station, 2002.
- [9] Arnold J G, Srinivasan P, Muttiah R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment. Part 1: Model development [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998,34(1):73-89.
- [10] 李占玲,徐宗学. 黑河流域上游山区径流模拟及模型评估[J]. 北京师范大学学报:自然科学版,2010,46(3):344-349.
- [11] Verburg P H, Soepboer W, Veldkamp A, et al. Modeling the spatial dynamics of regional land use: the CLUE-S model [J]. Environmental Management, 2002,30(3):391-405.
- [12] Verburg P H, Eickhout B, van Meijl H. A multi-scale, multi-model approach for analyzing the future dynamics of European land use[J]. The Annals of Regional Science, 2008,42(1):57-77.
- [13] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles[J]. Journal of Hydrology, 1970,10(3):282-290.
- [14] Gupta H V, Sorooshian S, Yapo P O. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 1999,4(2):135-143.
- [15] Pontius R G. Quantification error versus location error in comparison of categorical maps[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2000, 66(8): 1011-1016.
- [18] 王佑民. 中国林地水土保持功能研究概况[J]. 水土保持学报,2000,14(4):109-113.
- [19] Hanchi A, Rapp M. Stemflow determination in forest stands[J]. Forest Ecology and Management, 1997,97(3):231-235.
- [20] Wang Y L, Liu G B, Kume T, et al. Estimating water use of a black locust plantation by the thermal dissipation probe method in the semiarid region of Loess Plateau, China[J]. Journal of Forest Research, 2010,15(4):241-251.
- [21] Pressland A J. Rainfall partitioning by an arid woodland (*Acacia aneura* F. Muell.) in south-western Queensland[J]. Australian Journal of Botany, 1973,21(2):235-245.
- [22] 万师强,陈灵芝. 东灵山地区大气降水特征及森林树干茎流[J]. 生态学报,2000,20(1):61-67.
- [23] 董世仁,郭景. 华北油松人工林的透流、干流和树冠截留[J]. 北京林业大学学报,1987,9(1):58-68.
- [24] 王彦辉. 陇东黄土地区刺槐林水土保持效益的定量研究[J]. 北京林业大学学报,1986,8(1):35-52.
- [25] Staelens J, De Schrijver A, Verheyen K, et al. Rainfall partitioning into throughfall, stemflow, and interception within a single beech (*Fagus sylvatica* L.) canopy: influence of foliation, rain event characteristics, and meteorology [J]. Hydrological Processes, 2008,22(1):33-45.
- [26] Marin C T, Bouten W, Sevink J. Gross rainfall and its partitioning into throughfall, stemflow and evaporation of intercepted water in four forest ecosystems in western Amazonia[J]. Journal of Hydrology, 2000, 237(1):40-57.
- [27] 刘世荣,温远光,王兵,等. 中国森林生态系统水文生态功能规律[M]. 北京:中国林业出版社,1996.
- [28] 温远光,刘世荣. 我国主要森林生态系统类型降水截留规律的数量分析[J]. 林业科学,1995,31(4):289-298.
- [29] 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.
- [30] 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[J]. 林业科学,2004,40(1):84-91.
- [31] 王力,邵明安,侯庆春,等. 延安试区人工刺槐林地的土壤干层分析[J]. 西北植物学报,2001,21(1):101-106.
- [32] 陈云明,陈永勤. 人工沙棘林水文水土保持作用机理研究[J]. 西北植物学报,2003,23(8):1357-1361.
- [33] 霍竹,邵明安. 黄土高原水蚀风蚀交错带降水及灌木林冠截留特性研究[J]. 干旱地区农业研究,2005,23(5):88-92.

(上接第 163 页)