

基于 SWAT 模型的长江源土地利用/土地覆被情景变化对径流影响研究

李 佳^{1,4}, 张小咏^{2,3}, 杨艳昭³

(1. 中国科学院 新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; 2. 中国地震应急搜救中心, 北京 100049; 3. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101; 4. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要:土地利用/土地覆被变化对流域水资源循环过程及配置影响显著。为了研究土地利用/土地覆被情景变化对径流影响情况,以长江源流域为例,构建了适合该流域的分布式水文模型(SWAT),并模拟了不同土地利用/土地覆被情景下的流域年均径流量和径流深。模拟结果如下:当流域林地和草地面积增加到最大,径流量减少了 16.7%,达到 304.12 m³/s,径流深减少 14.02 mm;当林地和草地面积减少,并逐步变为沙地、裸地,流域径流量增加 16.1%,达到 424.32 m³/s,径流深也增加了 13.49 mm;当林地和草地面积减少到无植被覆盖,将使流域径流量增加 28.4%,达到 469.67 m³/s,径流深增加 23.88 mm;在草地覆被最佳状况下,径流量有所增加,但增加幅度不大,只有 5.6%,达到 385.98 m³/s,径流深增加 4.72 mm。综上所述,长江源流域林地和草地面积增加,导致径流减少,而沙地和裸地面积增加导致径流量增加。

关键词:SWAT; 径流模拟; 土地利用/土地覆被; 情景变化

中图分类号:P333.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)03-0119-06

SWAT Model of Runoff Study under Different Land Use Land Cover Scenarios in Source Region of the Yangtze River

LI Jia^{1,4}, ZHANG Xiao-yong^{2,3}, YANG Yan-zhao³

(1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 2. National Earthquake Response Support Service, CEA, Beijing 100049, China; 3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 4. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Land use and land cover change play an important role in catchment hydrology cycle. In order to analyze the hydrology effect caused by land use and land cover change, runoff and depth of runoff in the source region of the Yangtze River basin was estimated based on land use and land cover scenarios and SWAT model. The result showed; runoff decreased 16.7% with 304.12 m³/s and depth of runoff decreased 14.02 mm under the situation of forest and grass land covering whole area of the basin; runoff increased 16.1% with 424.32 m³/s and depth of runoff increased 13.49 mm when the forest and grass land area changed into sand and bare land; runoff and depth of runoff increased most when there were no forest and grass land, the runoff reached to 469.67 m³/s, increased 28.4%, depth of runoff increased 23.88 mm; there was a little increase of forest and grass land growing perfectly, runoff and depth of runoff increased 5.6% and 4.72 mm. It is obvious that increase of forestland and grassland made the runoff decrease and the increase of sand and bare land led to rise of runoff.

Key words: SWAT; runoff simulation; land use and land cover scenario scenarios change

土地利用/土地覆被变化通过改变地表植被截留量、土壤水文入渗能力、地表蒸发等因素^[1],而对流域

水文循环过程产生重大的影响。水文模型可通过建立流域降雨—径流过程以及土地利用/土地覆被变化作

收稿日期:2011-10-27

修回日期:2011-11-06

资助项目:国家自然科学基金项目“长江源区土地覆被水文效应模拟与分析”(40801006)

作者简介:李佳(1984—),男,重庆人,博士,主要研究方向为生态水文过程模拟。E-mail:lijiawanzhou@126.com

用的流域径流模型,定量评估该流域水量平衡各分量的变化特征和土地利用/土地覆被变化作用的程度^[2]。随着 GIS、RS 等信息技术发展,分布式水文模型也得到快速的发展,涌现出 SHE、IHDM、TOPMODEL、SWAT、DHSVM、WATFLOOD 等这类流域水循环模型。与传统的集总式水文模型相比,分布式水文模型能够反映水文水资源要素在空间上的变化,能够进行下垫面变换条件下的计算,特别是它具有更多的模拟功能,即能够把单一水量变化的模拟扩大到广泛的水文水资源和生态与环境问题模拟^[8]。因此,有必要利用分布式水循环模型开展土地利用/土地覆被的变化对水循环模拟结果的影响研究。在众多的分布式水循环模型中,国内外应用比较多的是 SWAT (Soil Water Assessment Tool) 模型,SWAT 模型被广泛地应用于 LUCC 水文效应尤其是径流模拟方面的研究。本文利用 SWAT 模型,综合考虑流域地形、气候、土壤和土地利用等因素,对长江源流域进行径流模拟,并分析未来土地利用/土地覆被变化情景下河流径流量的变化,以期水资源管理部门提供参考依据。

1 研究区概况

长江源区是青海省直门达水文站以上长江干支流的集水区域^[4],北起昆仑山脉,南抵唐古拉山脉,西自乌兰乌拉山和祖尔肯乌拉山,东临巴颜喀拉山,流域总面积 13.8 万 km²^[5]。地形为高山高原区,地势西高东低,四周山峰一般在 5 500 m 以上,其它地区海拔多在 4 000 m 以上。气候类型属于高原寒带半湿润—半干旱区,江源区季节只有暖湿、冷干之分,最冷月(1 月)平均气温 -13℃,极端最低气温 <-40℃,该区是青藏高原最寒冷的地区之一,最暖月(7 月)平均气温 9.7℃。降水量由东南向西北呈递减的趋势,年均降水量 365 mm。植被类型主要为高山草甸、高山草原和高原沼泽三大类。土壤类型有高山草甸土、沼泽土和高山草原土。多年冻土广泛分布,基本上覆盖了整个地区,居民以藏族为主,占 90% 以上,人口密度不到 1 人/km²,2000 年 8 月我国在青海省正式成立了三江源国家级自然保护区,长江源是其中的重要组成部分。

2 长江源流域 SWAT 模型的构建

2.1 模型简介

SWAT 是一个分布式的水文模型,利用 GIS 和 RS 提供的空间信息,可以模拟复杂大流域中多种不同的水文物理过程,包括水、沙和化学物质的输移与转化过程。模型可采用多种方法将流域离散化,能够

响应降水、蒸发等气候因素和下垫面因素的空间变化以及人类活动对流域水文循环的影响^[6-7]。

模型通过将整个流域按出水口的位置划分成若干个自然子流域,然后在子流域的基础上依据不同的土地覆被和土壤类型再划分成多个水文响应单元(HRU),通过调整每个子流域的基本参数来进行水文过程的模拟。它用于模拟地表水和地下水水质和水量,预测土地管理措施对不同土壤类型、土地利用方式和管理条件的大尺度复杂流域的水文、泥沙和农业化学物质的影响^[8]。此外,模型还可以通过天气发生器,模拟不同气候条件下的水资源变化,通过输入不同的土地覆被数据,模拟不同土地覆被情况下的水资源变化^[9]。

2.2 模型构建

SWAT 模型需要将流域划分为若干子流域。划分子流域首先要确定子流域的出口位置,长江源流域的子流域出口位置是直门达水文站。HRU 是指同一个子流域内具有相同土地利用类型和土壤类型的组合,是在子流域的基础上划分的最小地块单元。由于长江源区各子流域内土壤及土地利用类型并不相同,根据不同的土壤和土地利用类型进一步将长江源区各个子流域划分为若干个水文响应单元。

本研究用 DEM 提取流域河网时,生成流域集水面积为 13.78 万 km²,采用优势地面覆盖/优势土壤类型方法生成 HRU,阈值为 10/20,即按照子流域面积 10% 以上的土地覆被利用及此类土地覆被利用 20% 以上的土壤类型生成 HRU。将长江源流域分成 31 个子流域和 202 个 HRU(图 1)。

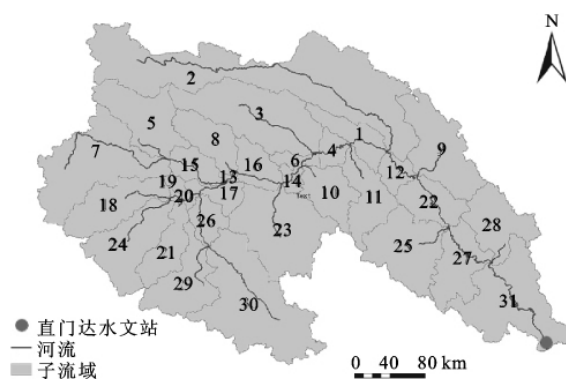


图 1 研究区子流域划分

2.2.1 DEM 数据 DEM 数据图来源于网上下载的 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)90 m 分辨率的数字高程数据(<http://srtm.csi.cgiar.org/>),应用 ArcGIS 对图形进行拼接、流域边界划分、投影变化等预处理操作,生成模拟所需的 DEM 数据资料(图 2)。

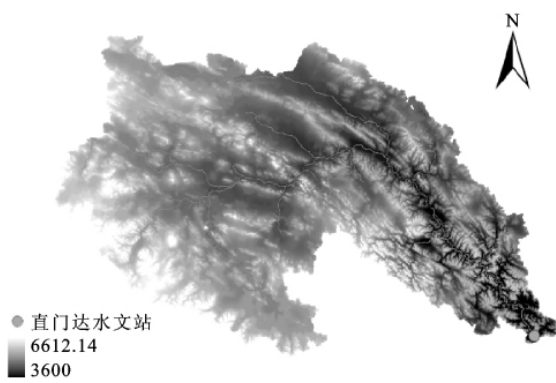


图 2 研究区数字高程模型

2.2.2 土地利用数据 本研究使用的土地利用类型空间分布图(2004 年),来自于中科院资源与环境数据中心。SWAT 模型采用的土地利用分类系统是美国国家地质调查局(USGS)的土地利用分类系统,配套的土地利用属性数据库也是 USGS 给出的参数,因此需要将上述土地利用重新分类,转换成与 USGS 相对应的系统分类,重新将土地利用类型分为 6 类,具体分类、代码和所占面积见表 1 和附图 7。

2.2.3 土壤类型数据 土壤数据包括土壤空间分布数据和土壤物理属性数据。土壤空间分布图是根据

研究区 2004 年的土壤数据制成,由中国科学院地理科学与资源研究所提供;土壤的物理属性数据主要包括土层厚度、砂粉、黏土、容积密度、有机炭、有效含水率、饱和水力传导率、有效田间持水量等,决定了土壤剖面中水和气的运动情况,并且对 HRU 中的水循环起着重要的作用。本研究根据研究区的实际情况建立用户土壤参数库,主要包括以下土壤物理参数(表 2)。

表 1 长江源流域土地利用分类对照表

| 编码 | 土地利用类型 | SWAT 代码 | 编码 | 土地利用类型 | SWAT 代码 |
|-----|--------|---------|-----|--------|---------|
| 21 | 有林地 | FRST | 51 | 城镇用地 | URBA |
| 22 | 灌木林地 | | 53 | 独立工矿用地 | |
| 24 | 其它林地 | | 52 | 农村居民点 | |
| 223 | 疏林地 | PAST | 63 | 盐碱地 | SWRN |
| 231 | 高盖度草地 | | 65 | 裸土地 | |
| 232 | 中盖度草地 | | 66 | 裸岩、石砾 | |
| 232 | 低盖度草地 | WATR | 64 | 沼泽地 | AGRC |
| 241 | 河渠 | | 113 | 水田 | |
| 242 | 湖泊 | | 121 | 山区旱地 | |
| 243 | 水库、坑塘 | | 122 | 丘陵旱地 | |
| 246 | 涂滩 | | 123 | 平原旱地 | |

表 2 SWAT 中需要输入土壤物理参数

| 序号 | 参数名 | 说明 | 输入级别 | 获取方式 |
|------|------------------|-------------------------|------|---------|
| (1) | SNAM | 土壤名称 | 按类输入 | 资料查询 |
| (2) | HYDGRP | 土壤水文组 | 按类输入 | 计算 |
| (3) | SOL_ZMX | 根系最大深度 | 按类输入 | 资料查询 |
| (4) | ANION_EXCL | 阴离子交换孔隙率 | 按类输入 | 默认值,0.5 |
| (5) | SOL_CRK | 土壤孔隙比 | 按类输入 | 资料查询 |
| (6) | TEXTURE | 土壤质地(名称) | 按类输入 | 可选,SPAW |
| (7) | SOL_Z(layer #) | 土壤表面到土层底深度 | 分层输入 | 资料查询 |
| (8) | SOL_BD(layer #) | 土壤容重 | 分层输入 | SPAW |
| (9) | SOL_AWC(layer #) | 土层可利用水量 | 分层输入 | SPAW,计算 |
| (10) | SOL_K(layer #) | 饱和导水率 | 分层输入 | SPAW |
| (11) | SOL_CBN(layer #) | 有机碳含量 | 分层输入 | 查询,计算 |
| (12) | CLAY(layer #) | 黏土%,直径<0.002 mm | 分层输入 | 资料查询 |
| (13) | SILT(layer #) | 壤土%,0.002 mm<直径<0.05 mm | 分层输入 | 资料查询 |
| (14) | SAND(layer #) | 沙土%,0.05 mm<直径<2 mm | 分层输入 | 资料查询 |
| (15) | ROCK(layer #) | 砾石%,直径>2 mm | 分层输入 | 资料查询 |
| (16) | SOL_ALB(layer #) | 地表反照率 | 分层输入 | 计算或默认值 |
| (17) | USLE_K(layer #) | 土壤侵蚀力因子 | 分层输入 | 计算 |
| (18) | SOL_EC(layer #) | 电导率 | 分层输入 | 默认值 |

表 2 中列出的 18 个参数及其获取方式,其中获取方式主要有 4 种,一是从土壤调查资料中获取,二是根据查到的参数结合使用 SPAW 软件获取,三是根据已知参数推算获取,四是采用 SWAT 自带默认值得到。

2.2.4 气象观测数据 SWAT 模型中的气象观测所需数据主要包括降水、日最高、最低气温、辐射、风

速和相对湿度,数据来源于中国科学气象网站整编的逐日观测资料,时段为 1975—2004 年。以上资料经手工录入到 Excel 后,均按模型要求以 DBF 格式文件存储。

2.2.5 径流数据 来自流域出口断面的直门达水文站的实际观测月径流资料。时间为 1975—2004 年。实测径流数据主要用于模型敏感性分析和参数校正。

3 SWAT 模型参数敏感性分析和率定

3.1 参数敏感性分析

在径流模拟中,采用 ArcSWAT 提供的参数敏感度分析模块进行参数敏感性分析,此模块采用的是 LH—OAT 灵敏度分析方法^[10]。灵敏性分析的目的在于分析判断哪些输入参数值的变化对输出结果的影响更重要,所以将通过灵敏性分析所确定的最为敏感的参数作为参考,选择重要的参数因子进行调整,使影响模拟结果的参数因子更加简明、清晰,同时又节省了调整参数的时间,从而提高模型的可用性。

本文将模拟的径流值和实测值对比,经过敏感性分析后,得到影响长江源流域径流模拟结果精度的 9 个重要参数(表 3)并对其进行参数率定。同时考虑到冰雪融化对径流的重要影响,对 SWAT 模型中的 SMFMX(最大融雪因子)、SMFMN(最小融雪因子)、SMTMP(融雪的最低气温)等融雪参数也进行率定。

表 3 参数敏感性分析

| 参数名称 | 排序 | 敏感值 |
|---------------------|----|-------|
| Alpha_Bf(基流回退系数) | 1 | 0.378 |
| Gwqmn(浅层蓄土层补偿深度) | 2 | 0.269 |
| Timp(积雪温度滞后因子) | 3 | 0.123 |
| Esco(土壤蒸发补偿因子) | 4 | 0.092 |
| Canmx(最大冠层蓄水量) | 5 | 0.064 |
| Revapmn(浅层地下水再蒸发系数) | 6 | 0.059 |
| Ch_K2(主渠道有效水力传导率) | 7 | 0.034 |
| Sol_Awc(土壤可利用水) | 8 | 0.032 |
| Cn2(SCS 径流曲线数) | 9 | 0.021 |

3.2 参数率定

当对模型参数进行敏感性分析之后,就需要对模型参数进行率定。参数率定的目的是提高模型效率,而模型效率反映了模型在研究区的适应性。参数率定遵循以下原则:先调整地表径流,再调整土壤水、蒸发和地下径流,以 1975—1994 年为模型校正期,1995—2004 年为验证期。本文选用 1975—1994 年长江源流域实测的月流量数据与模拟值进行校准,将

模型校准过程中所得到的参数,利用 1995—2004 年的实测资料进行验证。

本文选用相对误差 Re 、相关系数 R^2 和 Nash-Sutcliffe 系数 Ens 3 个指标来评价本文中的 SWAT 模型的适用性。图 3 是校准期月流量模拟值与实测值对比图,图 4 是验证期月流量模拟值与实测值对比图。从图 5 可以看出:(1)长江源区流域的 SWAT 模型模拟值与实测相比,略偏小,但基本反映了径流量的实际变化趋势。(2)长江源流域冬季径流极小,春季过后径流明显增大,这表明冬季气温低,冰川融水极少;春季气温回升,冰川融水对长江源流域径流产生了很大影响,是长江源流域径流量的重要组成部分。(3)夏季 6—9 月径流量最大,表明降水也是长江源流域夏、秋季节径流量的重要来源,且气温对该区径流有显著的调控作用,这与参数敏感性分析得出的积雪温度滞后因子(TIMP)最为敏感的结果相吻合。校准期和验证期月流量的模拟值和实测值拟合较好,如图 3—5 所示。

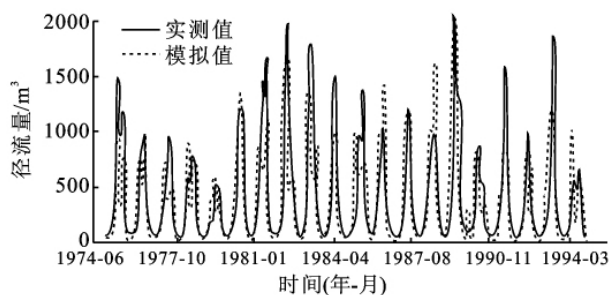


图 3 校准期月流量模拟值与实测值对比图

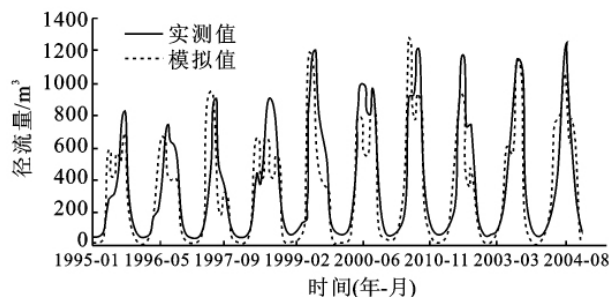


图 4 验证期月流量模拟值与实测值对比图

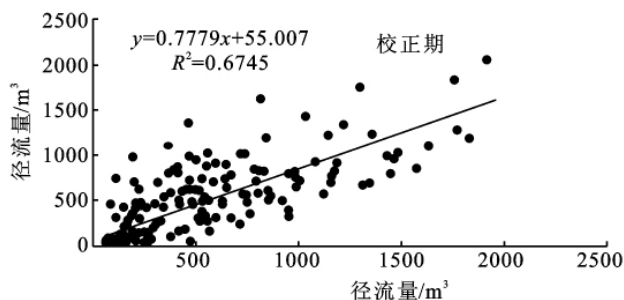
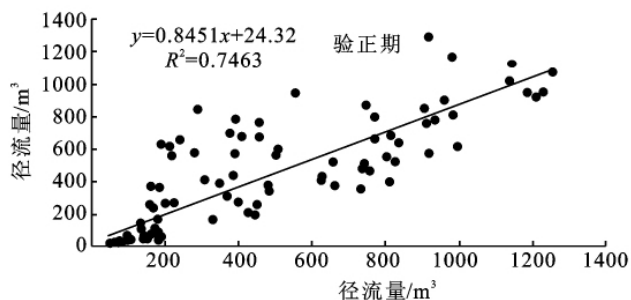


图 5 校正期和验证期的相关系数比较

从表 4 可以看出,校准期内模拟和实测月流量的值相差 $35.12\text{ m}^3/\text{s}$,相对误差为 8.6% ,相关系数为 0.67 ,NashSuttcliffe 系数为 0.78 ,模拟值与实测值之间的拟合较好,满足 SWAT 模型校准步骤中的要求,表明模型对流域产流的模拟是符合实际的。验证期内模拟和实测月流量的值相差 $23.29\text{ m}^3/\text{s}$,相对误差为 10.6% ,相关系数 R^2 和 NashSuttcliffe 系数 Ens 均大于 0.7 ,表明参数率定后的模型精度较高,可用于长江源流域土地利用/覆被情景变化对水文效应影响分析。

表 4 模拟评价结果

| 项目 | 月流量均值 | | Re | R^2 | Ens |
|-----|--------|--------|------|-------|------|
| | 实测 | 模拟 | | | |
| 校正期 | 406.35 | 371.23 | 8.6 | 0.67 | 0.78 |
| 验证期 | 365.34 | 333.05 | 10.6 | 0.75 | 0.83 |

4 土地利用 土地覆被情景下的水文效应模拟

4.1 土地利用/土地覆被情景设定

为了分析长江源土地利用/土地覆被对流域径流量的影响,本文根据长江源区 2004 年土地覆被状况及景观特征设计了情景模型。2004 年长江源流域土地利用类型主要为草地和未利用土地(荒漠、沙地和裸地),分别占 69% 和 24% 。其他类型是林地、水体和城镇居民地。由于长江源流域处于青海西部,土地利用/覆被动态变化主要受气候变化和人类放牧活动的影响。为了了解土地覆被变化对径流的影响,首先,设定理论上最好的情景(土地覆被恢复最佳状态),然后,设定理论上最差的情景(土地覆被一直恶化,恶化到最差情况),将这 2 个情景对比。事实上,考虑当地政策发展和人类需求,我们又设定积极恢复土地覆被的情景(通过管理措施)和土地覆被退化的情景(没有管理措施)。最后,我们以 2004 年土地覆被现状作为对照情景。因此,需要模拟的 5 种情景如下:

情景一:未来采取积极的土地资源和水资源管理监督措施,(全面禁伐,合理放牧和天然林保护工程实施等),根据土地覆被状况分析结果在流域范围内,除了少数居民地和水域以外,适合森林生长的土地都被植被所覆盖,适合草地生长的土地都被高中密度草覆盖,没有沙地和裸地,建立该情景后,流域范围内的高中密度草地覆盖率可以达到 80% 以上。

情景二:长江源区土地覆被一直朝恶性方向发展,草地急剧退化,土地沙化严重,地表无任何植被覆盖。均为沙地和裸地(将耕地、林地、草地变化为沙地、裸地)。

情景三:土地覆被为最佳状态;土地朝良性方向发展,大面积草场恢复自然状态,草质良好,草地以中高密度覆盖为主,草地覆盖率达 80% 。

情景四:土地退化较快,长江源区土地覆被以低覆被度草地和裸地为主,以此模拟长江源土地退化后的径流量变化情况。

情景五:2004 年代土地覆被现状,目的是对照其他 4 种土地覆被变化后的长江源区径流量状况情景。

情景一的草地覆被面积大约占整个流域的 93% ,而情景二几乎没有草地覆盖,情景三和情景四草地覆被面积分别占 69% 和 55% ,情景五则是 2004 年草地覆盖现状占面积的 69% 。情景三和情景五的草地面积没有变化,而情景三是最佳管理措施导致草地恢复良好,草地覆被以中高覆被为主。

4.2 分析方法

在长江源流域 2004 年现状土地利用下,分别将流域设置为 5 种土地利用/土地覆被情景,应用 SWAT 模型分别对每个情景下 1995—2004 年流域的径流量和径流深进行估算,并进行对比分析,从而确定流域各类土地利用情景对长江源水文效应的影响。

表 5 5 种土地利用/土地覆被情景下径流量模拟结果 m^3/s

| 年份 | 情景 1 | 情景 2 | 情景 3 | 情景 4 | 情景 5 |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1995 | 229.29 | 332.36 | 303.23 | 302.16 | 271.69 |
| 1996 | 244.10 | 365.70 | 331.29 | 336.66 | 295.73 |
| 1997 | 195.35 | 349.49 | 299.45 | 339.53 | 267.97 |
| 1998 | 275.31 | 477.58 | 399.93 | 443.41 | 372.75 |
| 1999 | 320.74 | 533.56 | 465.74 | 481.08 | 413.50 |
| 2000 | 325.52 | 566.83 | 454.85 | 504.07 | 435.23 |
| 2001 | 337.31 | 570.72 | 437.02 | 504.58 | 436.41 |
| 2002 | 369.45 | 503.54 | 388.37 | 459.96 | 388.79 |
| 2003 | 383.44 | 514.17 | 402.88 | 444.48 | 397.08 |
| 2004 | 360.71 | 482.74 | 377.08 | 427.26 | 374.23 |
| 年平均径流量 | 304.12 | 469.67 | 385.98 | 424.32 | 365.34 |

4.3 研究结果

根据以上设定的 5 个土地利用/土地覆被情景,模拟长江源流域径流量结果见表 5。从表 5 可以看出,地表径流和径流深大小顺序为情景二>情景四>情景三>情景五>情景一。模拟结果表明,随着地表草地和林地面积增加,长江源流域年均径流量减少。情景一反映流域植被面积达到理论的最大情况,导致径流量减少了 16.7% ,达到 $304.12\text{ m}^3/\text{s}$ 。然而随着地表林地和草地面积减少,并逐步变为沙地、裸地,长江源流域的年均径流量增加。情景四反映的是土地覆被退化,大多成为低覆盖草地和裸地后,流域年均径流量增加了 16.1% ,到达 $424.32\text{ m}^3/\text{s}$,径流深也有 97.1 mm 。模拟径流量最大值为情景二,即地表完全裸露,并无植被覆盖,将使长江源流域的年均径流

量增加 28.4%, 达到 $469.67 \text{ m}^3/\text{s}$, 这时的径流深到达 174.60 mm。而在以草地最佳状况的土地覆被下(情景三), 径流量有所增加。但增加幅度不大, 只有 5.6%, 达到 $385.98 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

5 讨论与结论

LUCC 水文效应的情景分析研究方法通常有参照对比法、历史反演法、模型预测法、极端土地利用法和土地利用空间配置法^[11]。本文采用极端土地利用方法, 它是一种 LUCC 水文效应研究的重要方法, 因为它代表了流域水文响应的可能变动范围, 也证实了所用模型的灵敏度。不管是运用哪种方法, 目前已有大量的 LUCC 水文效应尤其是径流模拟研究中, 还没弄清楚到底土地覆被增加或减少对流域径流的影响究竟是增加还是减少。然而, 一般认为, 北方地区尤其是干旱区年径流量随森林覆盖率增大而减小(石质山区除外), 南方湿润地区则相反。

不少学者应用 SWAT 模型也得出了类似的结论。李道峰在黄河河源区建立了 5 种较为极端的土地覆被情景并结合 24 组不同气温和降水的情景组合进行模拟, 结果表明随着植被覆盖度的增加, 流域年径流量减小, 汛期更为明显^[12]。郝芳华等应用 SWAT 模型在洛河流域进行研究, 该流域是北方地区以土石山区为主的流域, 山高坡陡, 土薄石多。在该流域 20 世纪 90 年代土地利用类型图的基础上, 结合当地的经济情况, 设定了 3 种土地利用情景进行模拟, 结果表明森林相对于草地和农业用地更具有增加径流的作用^[13]。陈军锋等在长江上游梭磨河流域对流域土地覆被的现状、流域全无植被、全为林地以及设定的未来最佳的土地覆被状况 4 种情景进行径流模拟。研究认为, 随着土地覆被状况的好转, 径流深减小, 且雨季减小幅度比枯季明显^[14]。

此外, 也有研究得出相反结论。比如 Guo 等在地处南方湿润区的江西省信江河流域进行研究时, 根据 2000 年的土地利用类型图, 设计了 6 种不同土地利用类型间相互转化情景, 研究认为, 退耕还林后森林面积的增加减少了雨季的径流量, 因为通过 SWAT 模型计算发现, 森林蒸散量比耕地更大, 而且该地雨热同期, 即使是在降雨相对充足的湿季(4—6 月), 伴随着的高温也会造成蒸散量的增大, 地表径流仍然呈现下降的趋势^[15]。

本文模拟的结果认为在长江源地区林地和草地增加, 导致径流减少, 而沙地和裸地增加导致径流量增加。然而本文研究结果也可能有一定的不确定性, 主要是参数的不确定, 包括土地覆被参数和土壤数据

库。我国的土地覆被类型与 SWAT 模型自带的土地覆被类型不一致, 许多中国典型的覆被类型也未被收录。因此在确定流域土地覆被类型的时候, 往往只能选取相近物种的参数替代, 无形中增加了计算误差。此外, SWAT 模型自带的土壤数据库也是针对北美的土壤, 和我国采用的土壤分类系统不同。我国现有的各地土种志中的数据不能直接配套使用。目前我国绝大多数研究者在建立研究区土壤数据库时, 是根据各地土种志中的数据再借由各种经验公式和软件推算而来, 尤其是土壤粒径含量, 研究表明^[16], 通过样条插值和线性插值法等数学方法换算的土壤粒径结果, 虽然可以实现较好的数学拟合, 但都不能排除误差的存在。而且, 土壤粒径分级是其他土壤数据库参数的基础, 它的误差会引起系统误差。

其实, SWAT 模型土壤数据库的一些重要参数可以通过实验测得。例如土壤的粒径分组, 土壤容重(SOL_BD), 有效田间持水量(SOL_AWC), 有机碳含量(SOL_CBN)等。利用实测的参数不仅可以提高模拟的精度, 降低不确定, 还可以使模型本地化, 更好在我国的流域水文效应研究应用。

参考文献:

- [1] 邓慧平, 李秀彬, 陈军锋, 等. 流域土地覆被变化水文效应的模拟: 以长江上游源头区梭磨河为例[J]. 地理学报, 2003, 58(1): 54-62.
- [2] 夏军, 谈戈. 全球变化与水文科学新的进展与挑战[J]. 资源科学, 2002, 24(3): 1-7.
- [3] 刘昌明, 郑红星, 王中根, 等. 流域水循环分布式模拟[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2006.
- [4] 杨建平, 丁永建, 刘时银, 等. 长江黄河源区冰川变化及其对河川径流的影响[J]. 自然资源学报, 2003, 18(5): 595-603.
- [5] 吴豪, 虞孝感, 许刚. 长江源区冰川对全球气候变化的响应[J]. 地理学与国土研究, 2001, 17(4): 1-5.
- [6] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Large are a hydrologic modeling and assessment. part I: model development[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34(1): 73-89.
- [7] Hotchkiss R H, Jorgensen S F, Stone M C, et al. Regulated river modeling for climate change impact assessment: the Missouri river [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2000, 36(2): 375-386.
- [8] 王中根, 刘昌明, 黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究[J]. 地理科学进展, 2003, 22(1): 79-86.
- [9] 欧春平, 夏军, 王中根, 等. 土地利用/覆被变化对 SWAT 模型水循环模拟结果的影响研究: 以海河流域为例[J]. 2009, 28(4): 124-129.

(下转第 128 页)

层。穴内靠近苗木根系处 20—40 cm 土层由于水分含量的增加,电导率值升高,在 60—80 cm 土层由于石砾隔盐层的排盐阻盐作用电导率值最低;穴外由于气候及土层深度的影响,使得 0—20 cm 土层和 60—80 cm 土层电导率值较高。

2.2 分析与讨论

研究区降雨少且集中,土壤水分和盐分含量关系密切,且变化趋势相反。随雨季的到来和结束,土壤含水量呈先增加后降低的趋势,土壤盐分则呈先逐渐降低后逐渐升高的趋势,即经历积盐—脱盐—返盐过程。

因土壤盐含量过高导致苗木死亡是盐碱地造林失败的直接影响因素。由于受塑膜、石砾隔岩层、围埂等的影响,试验区 I 号、II 号、III 号台田穴内含水量及电导率值均有相似的变化趋势:穴内平均含水量均高于穴外平均含水量,且靠近苗木根系处 20—40 cm 土层含水量达到最大,60—80 cm 土层由于石砾隔盐层的排水作用而使其含水量降低;穴内的平均电导率值均低于穴外,穴内靠近苗木根系处由于水分含量的增加,电导率值升高,在 60—80 cm 土层由于石砾隔盐层的排盐阻盐作用电导率值降低。

3 结论和建议

通过对造林穴内水分、盐分分析得出,I 号、II 号、III 号台田穴内平均含水量分别为 19.1%,19.4%,19.1%,穴外平均含水量分别为 18.0%,17.7%,17.9%,穴内含水量均高于穴外;I 号、II 号、III 号台田穴内平均电导率值分别为 1.91,1.98,2.10 mS/cm,穴外平均电导率值分别为 3.33,4.10,5.27 mS/cm,穴内电导率值均比穴外降低。穴状衬膜客土基盘能够有效地减少栽植穴内水分蒸发渗透和穴外土壤盐分的渗入,形成“花盆”效应,起到了保水阻盐的作用,为苗木生长提供了一个良好的局部土壤环境。客土基盘的配置,

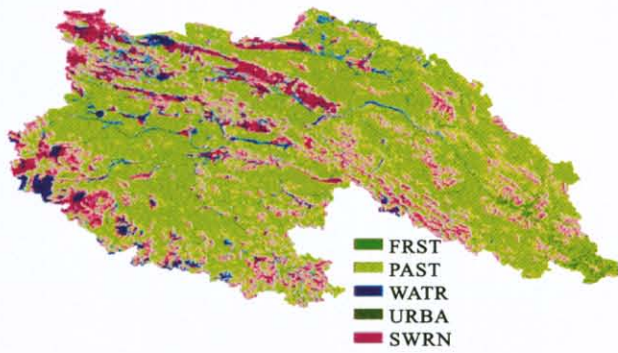
大大减少了对客土资源的大规模使用,降低了盐碱地造林的成本。因此,在滨海泥质盐碱地盐土这种特殊的困难立地上,将穴状衬膜和一定比例的客土基盘植苗造林结合滨海泥质盐碱地盐土造林技术,可降低土壤含盐量,进而提高苗木的成活率和保存率,比单纯客土造林费用低,加之操作简单,成本低廉,具有广阔的推广前景。

2011 年 8 月、9 月份,发现条状台田东部排水沟内大量的碱水并未排出,排水沟内水面上升,水面接近甚至超过隔离层,导致靠近排水沟一侧的部分苗木受到盐碱水的影响。因此在今后的整地设计中,应注意排水沟的深度及排水沟防渗工作,同时适当增加隔离层的高度,使其高于大潮水位线。另外,大穴的围埂由于受雨水及灌溉水的冲刷,部分围埂被破坏,导致树穴外盐含量较高的土壤进入树穴内,引起树穴内电导率值升高,所以要注意对大穴进行及时修护。

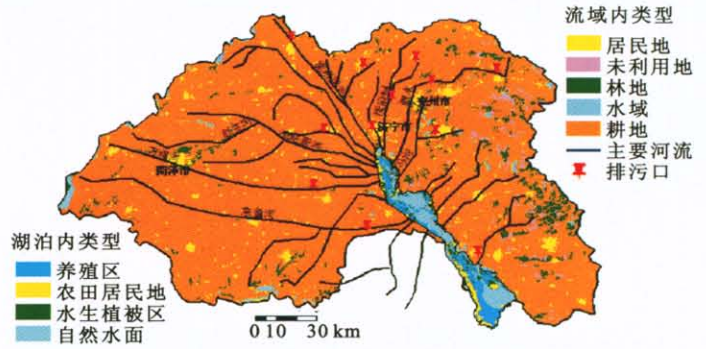
参考文献:

- [1] 王遵亲. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [2] 刘金荣, 谢晓蓉. 重盐碱地的改造及建植草坪的研究[J]. 水土保持通报, 2004, 24(1): 19-21.
- [3] Willis W O. Evaporation from layered soil in the presence of a water table[J]. Soil Sci. Soc. Proc., 1960, 24: 239-242.
- [4] 温修春, 吴群, 范黎. 灰色多层次综合评判与模糊聚类法在农用地定级中的应用[J]. 国土资源科技管理, 2004, 21(1): 59-63.
- [5] David G P. ALES: a framework for land evaluation using a microcomputer[J]. Soil and Management, 1990, 6(1): 7-20.
- [6] 景峰, 张学培, 郭汉清, 等. 山西省葛铺煤矿弃土弃渣径流泥沙研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(4): 61-64.
- [7] 中国土壤学会. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 45-56.
- [8] 沙的影响分析[J]. 水土保持学报, 2004, 18(3): 5-8.
- [9] 陈军锋, 李秀彬. 土地覆被变化的水文响应模拟研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(5): 833-836.
- [10] Guo H, Hu Q, Jiang T. Annual and seasonal stream flow responses to climate and land cover changes in the Poyang Lake Basin, China[J]. Journal of Hydrology, 2008, 355(1/4): 106-122.
- [11] 蔡永明, 张科利, 李双才. 不同粒径制间土壤质地资料的转换问题研究[J]. 土壤学报, 2003, 40(4): 511-517.
- [12] 王海龙, 余新晓, 武思宏, 等. SWAT 模型灵敏度分析模块在黄土高原典型流域的应用[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(增刊 2): 238-242.
- [13] 万荣荣, 杨桂山. 流域 LUCC 水文效应研究中的若干问题探讨[J]. 地理科学进展, 2005, 24(3): 25-33.
- [14] 李道峰, 田英, 刘昌明. 黄河河源区变化环境下分布式水文模拟[J]. 地理学报, 2004, 59(4): 565-573.
- [15] 郝芳华, 陈利群, 刘昌明, 等. 土地利用变化对产流和产

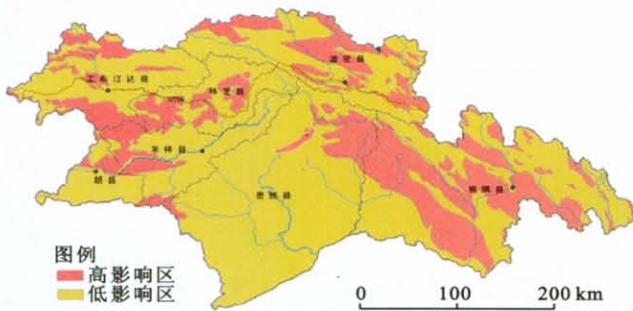
(上接第 124 页)



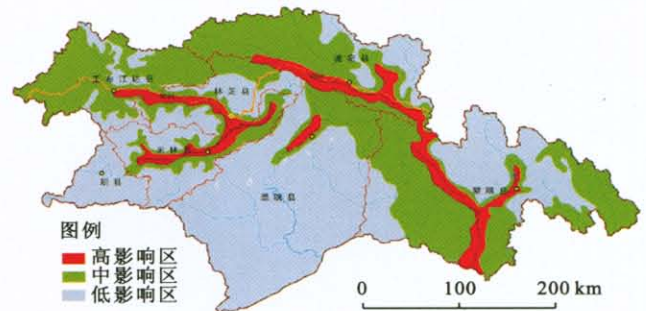
附图7 长江流域2004年土地利用/覆被变化



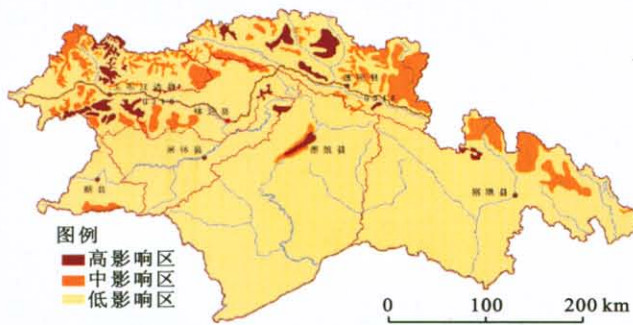
附图8 南四湖地表覆被和土地利用分类



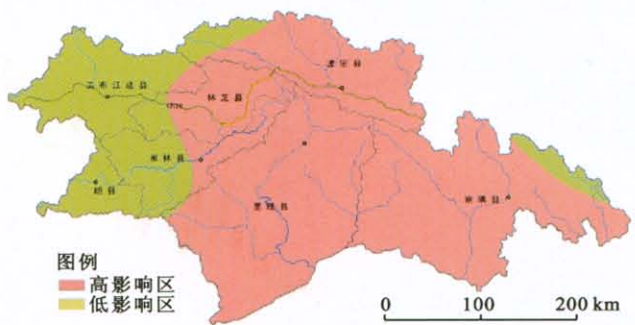
附图9 地质环境因子对西藏林芝地区泥石流易发区影响分区



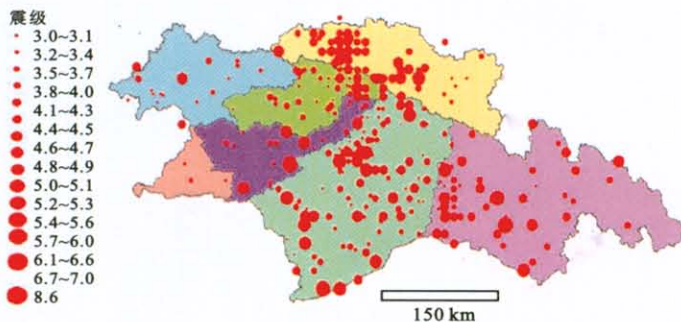
附图10 地貌因子对西藏林芝地区泥石流易发区影响分区



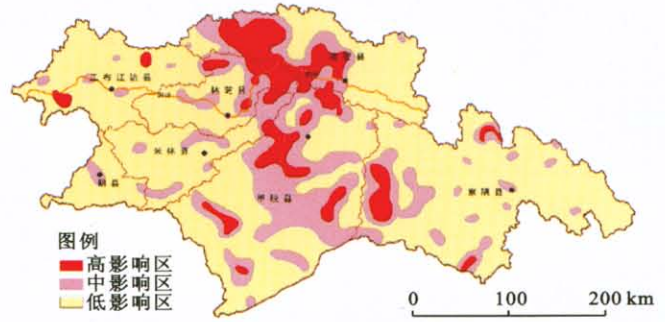
附图11 冰川活动因子对西藏林芝地区泥石流易发区的影响分区



附图12 气候因子对西藏林芝地区泥石流易发区的影响分区



附图13 1950年以来西藏林芝地区地震分布状况



附图14 地震因子对西藏林芝地区泥石流易发区的影响分区