

不同土地利用情景下岩溶水文水资源的响应研究

蒙海花, 王腊春, 霍雨

(南京大学 地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210093)

摘要: 以贵州省普定县后寨河流域为例, 采用基于落水洞的岩溶半分布式水文模型模拟了不同水平年在不同土地利用情景假设下的流域年、月径流量变化。结果表明, 极端土地利用情景下各水平年在极端水田和极端林地情景下年总径流量明显减少, 而极端裸岩使年总径流量增加相对不是很明显; 对于相同的降雨条件, 3 种极端土地利用情景下模拟得到的流域年总径流量大小排列顺序为: 裸岩 > 林地 > 水田; 年总径流量在流域优化空间情景假设下较现状模拟值将减少, 这主要是因为林地面积增加, 裸岩面积减少; 在极端情景假设和空间优化配置情景下土地利用变化对径流量的影响主要发生在夏、秋季节, 对冬、春季影响较小; 而且流域的水文响应敏感度都表现为: 枯水年 > 平水年 > 丰水年。

关键词: 极端土地利用情景; 空间优化配置; 后寨岩溶流域; 水文水资源响应

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)03-0017-05

中图分类号: P641.2, P931.5

Karst Hydrologic Response to Landuse and Land Cover Changes Scenarios — A Case Study of Houzhai River Basin

MENG Haihua, WANG Lachun, HUO Yu

(School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China)

Abstract: Based on the technology of remote sensing and geographic information systems, a karst sinkhole based semi distributed hydrological model was applied to study the impacts of various land use scenarios on runoff and hydrological processes within different years in the Houzhai River Basin located in Puding County, Guizhou Province. The results show that compared with the original land use type, forest and paddy field reduce substantially the runoff and the bare rock scenario increases the runoff slightly but not significantly. The runoff discharge followed the order as bare rock > forest land > paddy field under the extreme scenarios. An optimal land use scenario was designed according to the characters of land use with differential terrains. The simulated runoff discharges under the optimal scenario decreased, comparing to the original land use scheme. It seemed that the optimal scenario improves the efficiency of water resource utilization. Under the scenarios of the extreme land use and the optimal land use, runoff discharges were affected by land use to a greater degree in summer and autumn and to a less degree in winter and spring. The karst hydrological processes response to land use strongly in dry years, moderately in normal years, and weakly in wet years.

Keywords: extreme land use scenarios; optimal land use scenarios; Houzhai karst river basin; hydrological effect

目前, 土地利用/土地覆被(LUCC)针对区域尺度的环境效应的探讨逐渐增多^[1-3], 尤其是在流域尺度的 LUCC 变化与水的关系方面得到了学术界的重视^[4-7]。1996 年 IGBP-PAGES 出版了土地利用和气候变化对河流系统影响的研究专题; 1998 年, 国际农业研究磋商小组(CGIAR)就水资源与土地利用出版了评述文章^[8]; 2000 年, FAO 召开了“土地—水关系”的国际学术研讨会^[9]; 2001 年, IGBP/IHDP—

LUCC 项目把土地与水的关系列为该项目的优先科学问题^[10]; 2002 年以后, 国家自然科学基金有很多项目是关于土地利用/土地覆被的水文效应的, 主要研究区域为长江源区、黄土高原、东南沿海、潮河白河、滹沱、澧水、塔河干流和长江三角洲地区。LUCC 和水文循环的生物圈(BHAC)是国际地圈生物圈计划(IGBP)和全球环境变化人文计划(IHDP)的 2 个核心研究领域, 受到世界各国以及国际组织的广泛关

收稿日期: 2010-11-01

修回日期: 2010-12-01

资助项目: 国家自然科学基金重点项目“西南喀斯特流域水文变异性及生态水文过程耦合模拟研究”(40930635); 国家“973”基础研究计划“西南喀斯特山地土壤生态系统服务功能”(2006CB403208)

作者简介: 蒙海花(1983—), 女(汉族), 山西省朔州市人, 博士研究生, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: haihuameng@gmail.com。

注,是目前全球变化研究的热点之一,在全球环境变化中具有极其重要的意义,而且在全球环境变化和可持续发展中占有重要的地位。

西南岩溶地区自“九五”以来就开始了生态环境恢复重建和综合治理的示范研究,部分地区的生态环境已得到一定的恢复和改善。这些地区的下垫面条件相应地发生了改变,其水文过程也必然会发生变化。因此,研究西南岩溶地区水资源对不同土地利用情景假设的响应不仅很有必要而且具有一定的理论和应用价值。研究成果可为西南岩溶山区生态重建规划、生态模式设计提供科学依据,为进一步研究喀斯特流域洪旱灾害规律,指导防灾减灾,科学研究流域水资源开发利用方案等充实理论基础,对于保证流域社会经济可持续发展有一定的指导作用。

1 背景及数据

1.1 研究区概况

贵州省普定县后寨河流域位于普定县城以南,面积 80.65 km²。研究区属亚热带季风气候区,全年温湿多雨,冬温夏暖,春干秋雨。区内雨量丰沛,但时空分布不均。根据试验场内观测资料(1980—1995年),多年平均降雨量为 1 314.6 mm,丰水年为 1 433.1 mm,枯水年为 909.0 mm,雨季集中在 6—8 这 3 个月,其雨量占全年的 62% 左右。研究区地表、地下河发育。后寨河源头为母猪洞地下河出口,沿程有中坝小河、灯盏河汇入,经青山水库后至后寨水文站流出试验场,汇入波玉河。场内还发育了后寨(冒水坑)地下河系,地下水经老黑潭、六谷至后寨、冒水坑处流出地表,汇入后寨河。

1.2 数据

收集的水文气象数据包括流域内所有测站建站以来至 2002 年的降雨、蒸发、水位、流量资料。本次雨量按单元流域,采用算术平均法分别计算出母猪洞单元流域,母猪洞至老黑潭区间,老黑潭至冒水坑区间的面平均逐日雨量;蒸发量统一采用老黑潭站的蒸发量。其它数据包括:流域 1: 10 000 地形图;结合 DEM 和地下河的发育状况提取子流域和落水洞数据^[11];根据流域地形资料、1993 年份的 TM 图像资料,结合流域下垫面现状调查,分析 1993 年研究区土地利用类型。

2 模型构建与检验

基于落水洞的岩溶半分布式水文模型是构建在 DEM 基础上的一种水文模型,因为模型产流计算是基于每一个栅格的,而汇流计算是基于单元流域的,且模型中引入了落水洞汇流计算,因此本文构建的是

基于落水洞的岩溶半分布式水文模型。本文将研究区划分为大小相等、地表状况相对均一的栅格,栅格数据形式采用 ESRI GRID,横纵坐标的分辨率均为 30 m。在此基础上对每个栅格进行产流计算,再对整个流域从远到近的进行汇流,最终获得流域出口断面的水文过程,模型的构建过程和参数率定以及检验具体见文献[11]。

3 土地利用情景假设

土地利用变化受到自然、社会和经济等多方面因素的制约,如毁林、造林、农业灌溉以及城市化、交通等直接影响土地利用的变化。总结相关情景研究,本文将土地利用情景假设分为 2 种:

(1) 极端情景假设法。假设研究区域仅有一种土地利用类型(保持研究区水体不变),为了定量区分不同土地利用方式对流域流量的贡献,该方法可以分析流域水文响应的可能变动范围。虽然这些极端情景是与实际不相符合的情况,但由于现实的下垫面是多种要素组合在一起的复杂系统,各要素在系统中所起的作用很难辨别^[12]。为剔除土地利用变化中的不确定性因素的影响,采用极端土地利用变化的情景模拟进行分析,有利于确定单一土地利用在水文循环中所起的作用。本文假定 3 种极端情景:极端林地,极端水田和极端裸岩,具体情景设置如下。

情景 1(S₁):保留流域内的水域不变,将流域内所有地类设置为水田。

情景 2(S₂):保留流域内的水域不变,将流域内所有地类设置为林地。

情景 3(S₃):保留流域内的水域不变,将流域内所有地类设置为裸岩。

(2) 流域空间优化配置法。

根据动力学、重力学和农业生产实践,以及研究区域特殊的地质背景,构建空间最优的土地利用情景。坡度大于 25°为斜坡地,水土流失较为严重,故把坡度大于 25°的水田、旱作地、裸岩+旱作地和裸岩都设置为林地;坡度小于 25°为平缓地,水土流失微弱,原地类中的农田、水域和林地保持不变,而把裸岩以及裸岩+旱作地设置为林地。在 ArcGIS 软件下将坡度图重分类,与原地类图(1993 年)进行叠加,生成流域空间配置最优情景的地类图(附图 2),最优情景下各地类构成见表 1。

由表 1 可以看出,母猪洞、老黑潭子流域和后寨全流域主要的土地转换类型为旱作地+裸岩以及裸岩转换为林地。这主要是由于 25°坡度上退耕还林的影响,而且转换比率表现为:母猪洞子流域>老黑潭子流域>后寨全流域。

表1 最优情景下的地类构成 km^2

土地利用 类型	母猪洞		老黑潭		全流域	
	原类	新类	原类	新类	原类	新类
水域	0.00	0.00	0.02	0.02	0.95	0.95
旱作地	0.08	0.06	0.42	0.38	16.70	16.36
水田	0.49	0.40	1.68	1.43	19.24	17.77
旱作地+ 裸岩	3.17	0.00	6.01	0.00	33.80	0.00
裸岩	0.11	0.00	0.87	0.00	2.91	0.00
林地	0.28	3.68	1.65	8.89	7.00	45.52

4 结果分析

为了进一步揭示在枯水年、平水年、丰水年降雨条件下土地利用变化对流域径流量的影响有何区别, 对后寨河流域 1984—2002 年的降雨量进行频率统计, 得到研究区年降雨量理论频率曲线。在此基础上, 选取了与年降水频率为 5%, 50%, 95% 这 3 种情况相近的 1996, 1994, 1989 年分别作为丰、平、枯水年, 利用构建的基于落水洞的岩溶半分布式水文模型, 对不同土地利用情景假设下的降雨径流过程进行

模拟, 研究土地覆被变化的水文效应, 主要研究土地利用变化对径流量和水文过程的影响规律。

4.1 极端土地利用情景假设下的径流量变化

研究区各水平年在极端土地利用情景下, 全流域和子流域的年总径流量模拟结果如表 2 所示, 年总径流量变化率如表 3 所示。

由表 2 可以看出, 对于相同的降雨条件, 极端裸岩会使年总径流量增加, 而极端水田和极端林地会使年总径流量减少, 因此 3 种极端土地利用情景下模拟得到的流域年径流量以极端裸岩情景最大, 其次是极端林地, 极端水田最小, 即模拟的流域年总径流量大小顺序为: 极端裸岩 > 极端林地 > 极端水田。由表 3 可以看出, 不同的极端情景假设引起的年总径流量变化率在 3 个水平年基本都表现为枯水年最敏感, 平水年次之, 丰水年最不敏感。其中, 在相同降雨条件下, 母猪洞子流域在极端林地和极端水田情景下年总径流量变化最敏感, 老黑潭子流域次之, 全流域最不敏感。而极端裸岩情景下年总径流量敏感度则表现为: 全流域 > 老黑潭子流域 > 母猪洞子流域。

表 后寨河流域极端土地利用情景下的径流量相对变化量

 10^4 m^3

极端土地 利用类型	母猪洞			老黑潭			全流域		
	$P=95\%$	$P=50\%$	$P=5\%$	$P=95\%$	$P=50\%$	$P=5\%$	$P=95\%$	$P=50\%$	$P=5\%$
S_1	-106.13	-75.91	-88.67	-199.39	-109.81	-142.49	-287.27	-205.02	-243.63
S_2	-56.09	-124.07	-135.47	-138.29	-182.84	-177.15	-186.25	-291.14	-257.73
S_3	22.78	27.97	31.07	64.93	54.64	73.92	241.37	268.72	297.50

注: P 为降水频率; S_1 为极端水田; S_2 为极端林地; S_3 为极端裸岩。下同。

表 3 后寨河流域极端土地利用情景下的径流量模拟值变化率

%

极端土地 利用类型	母猪洞			老黑潭			全流域		
	$P=95\%$	$P=50\%$	$P=5\%$	$P=95\%$	$P=50\%$	$P=5\%$	$P=95\%$	$P=50\%$	$P=5\%$
S_1	-39.10	-28.90	-22.99	-35.14	-24.36	-18.58	-15.00	-10.47	-8.07
S_2	-20.66	-17.68	-15.05	-24.38	-14.63	-14.94	-9.73	-7.37	-7.63
S_3	8.39	6.52	5.27	11.44	7.28	7.75	12.60	9.66	9.32

这主要是因为, 在 S_1 情景下, 母猪洞子流域有 88% 的其它土地利用转换为水田, 老黑潭子流域有 84% 的其它土地利用转换为水田, 全流域有 75.5% 的其它土地利用转换为水田, 因此在 S_1 情景下, 母猪洞子流域年总径流量变化率最大, 老黑潭子流域次之, 全流域最小。在 S_2 情景下, 母猪洞子流域有 91.3% 的其它土地利用转换为林地, 老黑潭子流域有 80% 的其它土地利用转换为林地, 全流域有 71% 的其它土地利用转换为林地, 因此在 S_2 情景下, 母猪洞子流域年总径流量变化率最大, 老黑潭子流域次之, 全流域最小。在 S_3 情景下, 母猪洞子流域有 20% 的其它土地利用转换为裸岩, 老黑潭子流域有 35% 的其它土地利用转换为裸岩, 全流域有 54% 的其它土地利用转换为裸岩, 因此在 S_3 情景下, 母猪洞子流域年总径流量变化率最

小, 老黑潭子流域次之, 全流域最大。上述结果说明林地能够涵养水源、调节径流, 同时水田也会减少径流, 当地水土保持部门应该考虑区域水土保持的土地利用格局, 据此可有针对性地对土地利用进行相应的调整, 实现土地利用结构的合理开发与配置。

4.2 流域优化空间配置下的年总径流量变化

将流域优化空间配置下的土地利用类型数据和 1989 年(枯水年), 1994 年(平水年), 1996 年(丰水年)的气象数据输入模型, 采用率定和校正过的参数进行模拟, 分析优化空间配置下的年总径流量与原地类(1993 年)的差异, 年总径流量模拟结果见表 4。由表 4 可见, 在优化空间配置情景下各子流域和全流域在不同降雨条件下年总径流量都将减少, 而且年总径流量变化率基本都表现为母猪洞子流域 > 老黑潭子

流域> 全流域。各子流域年总径流量减少量在最优情景下都表现为丰水年> 平水年> 枯水年, 但各流域径流量减少率在最优化情景下都表现为枯水年> 平水年> 丰水年。这主要由于最优情景下, 母猪洞和老黑潭子流域的旱作地+ 裸岩和裸岩都转变为林地, 使林地面积增加, 分别由原来的 6. 7% 和 15. 51%, 增加到 88. 78% 和 82. 74%, 全流域的林地由原来的 6. 61% 增加到 55. 47%, 其它土地利用类型基本没有变化,

因此其产流量将会减少, 而且母猪洞子流域林地增加了 82%, 老黑潭子流域增加了 67%, 全流域增加了 49%, 因此相应的径流量变化率为母猪洞子流域最大, 老黑潭子流域次之, 全流域最小。

4.3 月径流量变化

本文以平水年 1994 年为例, 说明流域各极端情景和流域优化空间配置下土地利用变化对月径流量的影响(图 1)。

表 4 后寨河流域优化空间配置下径流量模拟值

径流量	母猪洞			老黑潭			全流域		
	P= 95%	P= 50%	P= 5%	P= 95%	P= 50%	P= 5%	P= 95%	P= 50%	P= 5%
1993 年土地利用	271. 43	429. 28	589. 36	567. 34	750. 57	953. 44	1 915. 09	2 781. 22	3 191. 95
优化空间	210. 35	348. 54	496. 01	447. 41	625. 86	830. 69	1 804. 83	2 554. 24	3 002. 43
变化量/ 10^4 m^3	- 61. 08	- 80. 74	- 93. 35	- 119. 93	- 124. 72	- 122. 75	- 110. 26	- 226. 97	- 189. 52
变化率/%	- 22. 50	- 18. 81	- 15. 84	- 21. 14	- 16. 62	- 12. 87	- 5. 76	- 8. 16	- 5. 94

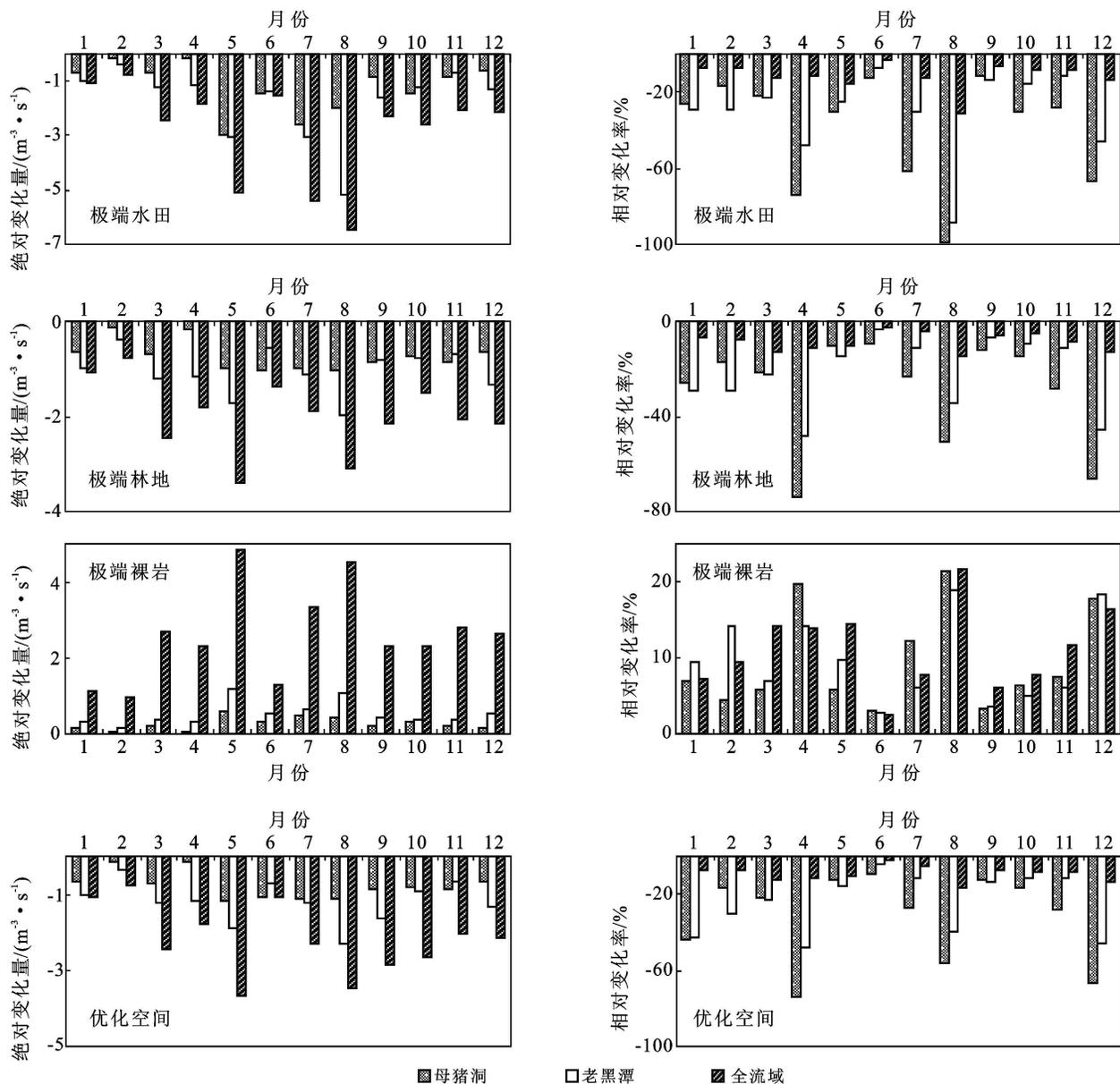


图 1 1994 年不同极端情景和流域优化空间配置假设下月径流量模拟(相对于 1993 年)

由图1可以看出,母猪洞和老黑潭子流域以及全流域月径流量在极端水田、极端林地和优化空间情景下比1993年土地利用情景下都减少,但月径流量在极端裸岩情景下比1993年土地利用情景下增加。并且径流量的增加和减少主要集中在丰水期,即对丰水季的径流量调节作用大,但各月径流量的相对变化率在丰水期反而较小,在枯水期较大,其中4、8月份相对变化率最大。主要是因为绝对变化量大的月份多集中于丰水期,丰水期雨量大,径流量也多,因此相对变化率就较小。由此可以看出植树造林可以减少丰水期径流量,从而减少石漠化速度,因此今后应将封山育林放在首位。

5 结论

在对贵州省普定后寨河流域土地利用变化进行分析的基础上,本文利用基于落水洞的岩溶半分布式水文模型对后寨河流域的水文过程进行了模拟和验证,并通过情景模拟分析了不同土地利用情景下流域水文水资源和水文过程的响应。

(1) 极端土地利用情景下各水平年在极端水田和极端林地情景下年总径流量明显减少,相对而言,极端裸岩使年总径流量的增加不是很明显。对于相同的降雨条件,3种极端土地利用情景下模拟得到的流域年总径流量大小排列顺序为极端裸岩> 极端林地> 极端水田。研究区各月总径流量在极端水田和极端林地情景下都减小,而在极端裸岩情景下增大,并且径流量的增加和减少主要集中在丰水期,但各月径流量的变化率在丰水期反而较小,在枯水期较大。这说明在该区域降水量愈大,其年总径流量变化愈大,降水量愈小,径流变化愈小,但是相对变化大。这同时说明植被变化主要影响洪水期径流,而对枯水季径流影响较小。土地利用变化对径流量的影响主要发生在夏、秋季节,对冬、春影响较小。

(2) 年总径流量在流域优化空间情景假设下较现状模拟值少,这主要是因为林地面积增加,裸岩面积减少。

(3) 降雨特征直接影响了土地利用变化的水文响应程度,在极端情景假设和空间优化配置情景下流域的水文响应为枯水年的水文响应最强,其次是平水年,丰水年响应最弱。

(4) 通过对几种情景假设的径流量对比分析,发现全流域在极端水田假设下径流量变化率为-8.07%~

-15.00%,极端林地假设下径流量变化率为-7.37%~-9.73%,极端裸岩假设下径流量变化率为9.32%~12.60%;在优化空间情景假设下径流量变化率为-5.76%~-8.16%。可见在极端情景下径流量变化率最大,是径流量变化的一个范围,优化空间下径流量是在空间配置最优的情景下径流量的变化率,其范围在极端林地情景假设下的范围之内。

[参 考 文 献]

- [1] 傅伯杰,陈利顶,马克明. 黄土丘陵区小流域土地利用变化对生态环境的影响:以延安市羊圈沟流域为例[J]. 地理学报, 1999, 54(3): 241-246.
- [2] 李秀彬. 全球环境变化研究的核心领域:土地利用/土地覆被变化国际研究动向[J]. 地理学报, 1996, 51(6): 553-557.
- [3] Crooks S, Davies H. Assessment of land use change in the Thames Catchments and its effect on the flood regime of the river [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2001, 26(7/8): 583-591.
- [4] 史培军,袁艺,陈晋. 深圳市土地利用变化对流域径流的影响[J]. 生态学报, 2001, 21(7): 1041-1049.
- [5] Batelaan O, Smedt D F, Triest L. Regional groundwater discharge: Phreatophyte mapping, groundwater modeling and impact analysis of land use change [J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 275: 86-108.
- [6] 高超,翟建青,陶辉,等. 巢湖流域土地利用/覆被变化的水文效应研究[J]. 自然资源学报, 2009, 24(10): 1794-1802.
- [7] 陈莹,许有鹏,尹义星. 基于土地利用/覆被情景分析的长期水文效应研究:以西苕溪流域为例[J]. 自然资源学报, 2009, 24(2): 351-359.
- [8] Calder I R. Water resource and land use issues. SWIM Paper 3, Colombo Sri Lanka [J]. *International Water Management Institute*, 1998: 323-356.
- [9] Kiersch B. Land use impacts on water resources: A literature review [M] // *Land Water Linkages in Rural Watersheds Electronic Workshop*, 2000: 142-175.
- [10] Serneels S. Priority of questions for land use/cover change research in the next couple of years [J]. *LUCC Newsletter*. 2001, 7: 1.
- [11] 蒙海花,王腊春,苏维词,等. 基于落水洞的岩溶半分布式水文模型的构建及其应用[J]. 地理科学, 2009, 29(4): 550-554.
- [12] 万荣荣,杨桂山. 流域土地利用/覆被对洪峰的影响研究:以太湖上游西苕溪流域为例[J]. 自然资源学报, 2009, 24(2): 318-327.



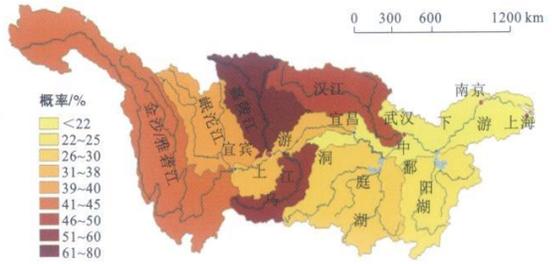
a ENSO事件年高低温灾害概率



b ENSO事件转换年高低温灾害概率

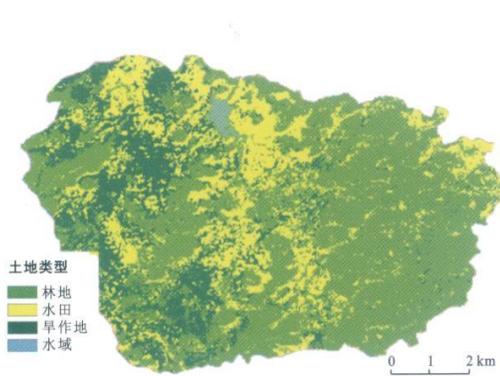


c ENSO事件年旱涝灾害概率

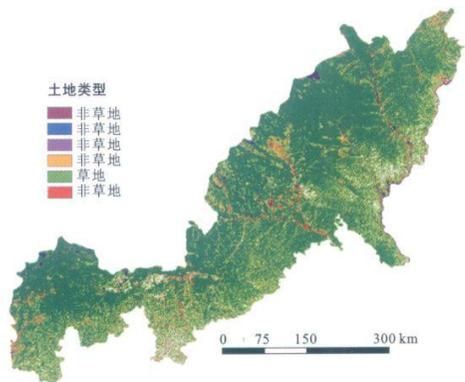


d ENSO事件转换年旱涝灾害概率

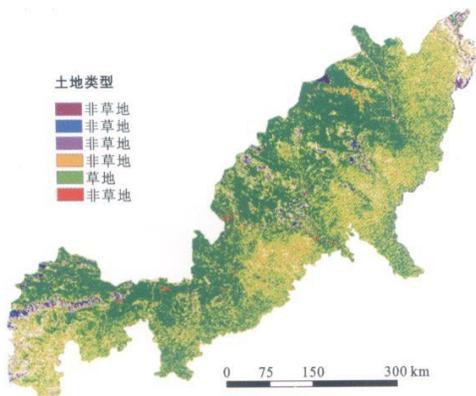
附图1 ENSO事件年和ENSO事件转换年气象灾害概率分布



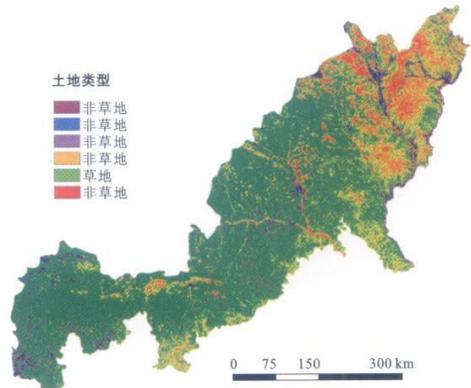
附图2 流域空间配置优化情景土地利用图



附图3 陕北农牧交错带1990年草地退化现状



附图4 陕北农牧交错带2000年草地退化现状



附图5 陕北农牧交错带2006年草地退化现状