

土地覆被和气候变化对拉萨河流域径流量的影响

张圣微^{1,2}, 雷玉平¹, 姚 琴^{1,3}, 李红军¹

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, 河北 石家庄 050021; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 靖江市规划局, 江苏 靖江 214500)

摘要 以拉萨水文站上游流域为研究对象, 利用分布式水文模型 SWAT 对拉萨河流域水文过程进行模拟, 分别用 1995 ~ 2000 和 2003 ~ 2006 年两个时间段的实测数据对模型进行校准和验证。结果显示月径流模拟相关系数和模拟效率系数分别为 0.88 和 0.84。在此基础上通过建立情景模拟, 探讨拉萨河流域气候波动和土地覆被变化对径流产流量的影响。结果表明: 气候变化对年径流量影响显著, 在各种模拟假设情景中最多可以使径流量增加 89%。土地覆被变化相对于气候变化对径流量的年际影响较弱, 但对径流量的季节变化影响显著。

关键词 拉萨河流域; SWAT 模型; 土地覆被变化; 气候变化

中图分类号 TV211.1+1 **文献标识码** A **文章编号** 1004-6933(2010)02-0039-06

Runoff response to land cover and climate change in Lhasa River Basin

ZHANG Sheng-wei^{1,2}, LEI Yu-ping¹, YAO Qin^{1,3}, LI Hong-jun¹

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetic and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050021, China; 2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Jingjiang Urban Planning Bureau, Jingjiang 214500, China)

Abstract : The distributed hydrological model SWAT was used to simulate the hydrological processes in the Lhasa River Basin upstream of the Lhasa hydrological station. Observed data from the Lhasa hydrological station from 1995 – 2000 and 2003-2006 were used to calibrate and validate the model, respectively. The correlation coefficient (R^2) and simulation efficiency factor (ENS) of monthly simulation were 0.88 and 0.84, respectively. On this basis, scenario simulations of different land cover and climate change were established. Results showed that the climate effect was the dominant factor in annual runoff. The greatest increase of runoff in the various simulated scenarios was 89%. Land cover change had a moderate impact on annual runoff, but strongly influenced seasonal runoff.

Key words : Lhasa River Basin; SWAT model; land cover change; climate change

为了解决当今世界日益严重的水资源问题, 掌握水文系统各个分量的变化规律, 探讨区域环境变化将对水资源产生怎样的影响, 已成为水资源研究的热点之一。近年来众多的研究人员致力于气候和人类活动对水文系统不同时间和空间尺度影响的研究^[1-4], 这些研究表明气候和土地利用变化对区域水文循环有明显的影 响。但是, 土地利用-土地覆盖变化的差异也导致其对于地表径流的影响是不同的, 而且这些影响由于各地区气候条件的不同而更加复杂。如文献[5]指出, 在湿润地区甚至是很多极端的土地利用变化也仅仅对区域水平衡产生很小的影响, 而在

非洲热带雨林地区却得出了与之相反的结论^[2]。

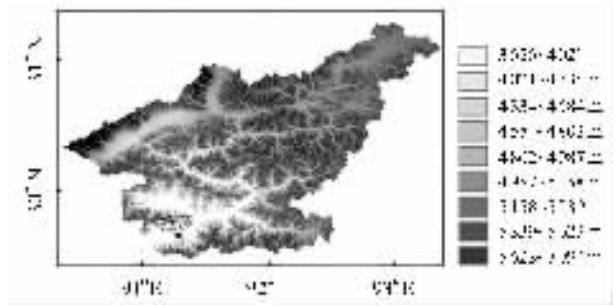
青藏高原是全球海拔最高的一个巨型构造地貌单元, 具有独特的自然环境和空间分异规律。高原的隆起对高原及其毗邻地区自然环境的演化影响深刻, 其气候变化与全球环境变化密切相关。近年来在青藏高原开展了一系列的全球气候变化研究, 如集中研究历史时期气候变化的自然过程^[6]、现代气候变化及其环境效应^[7-8], 以及未来气候变化趋势与对策等^[9]。而对于气候和土地覆盖土地利用变化对水文过程尤其是流域产流量影响的研究甚为少见。

拉萨河流域是西藏自治区政治、经济、文化的中

心,了解流域水文过程及其在气候和土地利用变化下的发展变化趋势对该地区的生态环境以及社会经济都意义重大。因此利用分布式水文模型 SWAT (Soil and Water Assessment Tool),建立拉萨河流域的分布式水文模拟系统,并进一步通过改变模型的输入条件,模拟研究区环境变化对径流的影响,从而为流域的水资源规划管理和综合开发利用提供理论依据。

1 研究区域

拉萨河是雅鲁藏布江的主要支流之一,位于雅鲁藏布江中游的左岸,全长 495 km,海拔高度由源头 5500 m 到河口 3580 m,是世界上最高的河流之一。拉萨河流域位于北纬 29°20′ ~ 31°15′,东经 90°05′ ~ 93°20′,流域面积为 3.25 万 km²。拉萨河的主要支流有麦曲、桑曲、学绒藏布、墨竹马曲、玉年曲和堆龙曲等。研究区域为拉萨河拉萨水文站以上流域,集水面积为 26 225 km²,占整个拉萨河流域面积的 80.5%。流域内包括拉萨气象站以及拉萨、唐加、旁多 3 个水文站。研究区地理位置及数字高程如图 1 所示。



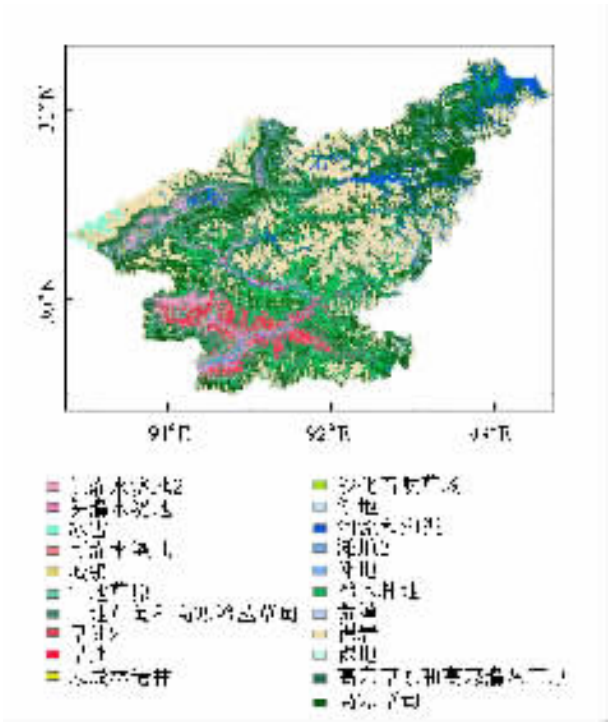


图2 拉萨河流域土地利用土地覆盖类型

表1 拉萨河流域土地利用类型、代码及所占面积

名称	代码	面积/km ²	比例/%
灌木	RNGB	3 570.87	12.10
山地草原	RNGE	4 117.30	13.95
水体	WATR	2 055.25	6.96
滩地	WETN	398.18	1.35
裸岩	SWRN	7 129.86	24.15
林地	FRST	0.88	0.01
耕地	AGRL	2 023.07	6.85
高寒草甸	SPAB	7 614.17	25.79
城镇	URMD	5.19	0.02
高寒草原和高寒灌丛草原	SPAS	213.69	0.72
裸地	LUOY	2 389.98	8.10

面积比重最大,占流域总面积的 50.10%,其次是亚高山草原土和寒漠土,占到总面积的 24.32% 和 11.32%,整个流域以高山草甸土、亚高山草原土和寒漠土为主,3 项之和占到整个流域面积的 85.74%。

2.2.2 模型模拟系统建立

模型结构和输入参数初步确定后,需要对模型进行校准和验证。将已有资料系列分为两部分,一部分用于校准模型,另一部分则用于模型的验证。校准是调整模型的参数,使得模型的计算结果与实测数据相匹配,该过程是建立模型模拟系统的关键一步。模型的参数校准完成后,应用参数校准以外的数据对其进行验证,以评价模型的适用性。在对一些常规水文过程参数调整的基础上笔者还针对拉萨流域的地域特点着重对融雪模块进行了调整,调整结果见表 3。

表 2 土壤物理属性参数

土壤类型	土层最大深度/mm	密度/(g·cm ⁻³)	土壤可利用水量/mm	饱和导水率/(mm·h ⁻¹)	各种土壤成分所占比重/%		
					黏土	粉沙	沙粒
斑毡巴嘎土	80	1.20	0.09	50.72	11.1	21.3	67.6
	280	1.40	0.07	25.45	13.8	19.9	66.3
	430	1.50	0.07	19.22	15.3	21.1	63.6
	680	1.55	0.07	13.18	18.3	19.2	62.5
巴嘎土	90	1.52	0.06	43.86	10.1	15.4	74.5
	230	1.57	0.04	27.24	11.3	9.9	78.8
	420	1.60	0.03	16.71	13.6	7.0	79.4
	800	1.60	0.05	35.48	12.0	7.8	80.2
	1 040	1.60	0.05	20.83	13.7	11.9	74.4
	1 200	1.59	0.04	29.65	10.5	11.9	77.6
黑毡土	180	1.09	0.11	65.28	12.0	21.9	66.1
	460	1.22	0.10	33.72	15.1	23.9	61.0
	690	1.47	0.07	18.23	16.3	22.8	60.9
	930	1.56	0.05	13.69	15.7	18.4	65.9
山地灌丛草原土	160	1.51	0.05	101.64	5.3	7.8	86.9
	370	1.55	0.05	87.89	5.5	9.4	85.1
	560	1.52	0.04	135.38	4.1	6.3	89.6
	870	1.58	0.05	75.98	6.9	10.5	82.6
	1 030	1.60	0.07	58.53	8.7	16.6	74.7
寒漠土	330	1.52	0.02	34.22	3.5	5.2	91.3
	520	1.59	0.05	47.56	6.5	17.8	75.7
	710	1.58	0.02	30.30	5.5	11.5	83.0
草毡土	80	1.27	0.09	35.35	14.2	22.8	63.0
	240	1.29	0.08	36.36	12.9	16.8	70.3
	580	1.50	0.03	13.54	14.8	9.5	75.7
	1 000	1.58	0.04	6.66	12.1	36.3	51.6

表 3 融雪参数输入值

输入参数	参数值
高程带	0~4 200 m 4 200~4 800 m; 4 800~5 500 m 5 500~7 000 m
降水递减率	130 mm/km
温度递减率	-2℃/km
雨雪分界阈值	0℃
最大融化系数	6.5 mm/(℃·d)
最小融化系数	4.0 mm/(℃·d)
降雪温度滞后系数	0.5℃
降雪融化阈值温度	0℃
100%雪覆盖面积阈值	300 mm
50%与 100%雪覆盖雪水当量系数	0.5

此外,土地管理、耕作制度和施肥措施等都根据当地实际情况进行了设置,并根据研究区域土壤及地标产汇流情况设定了降雨-径流曲线号(CN 值)。通过以上过程建立了 SWAT 模型拉萨河流域模拟系统,为下一步进行土地利用土地变化和气候变化对流域水文过程影响研究构建了平台。

3 研究结果

3.1 模型验证及评价

利用流域出口处拉萨水文站的多年实测径流数据对 SWAT 模型在研究区径流量模拟结果进行分析。模型校准期为 1995~2000 年,验证期为 2003~

2006 年。验证期内径流量日月模拟值与实测数据对比如图 3。从图 3 可见,模型模拟的两种不同测量时间尺度径流量的变化趋势和峰值除 2006 年外均与实测数据基本一致,模拟结果与实测值基本重合。这是因为 2006 年为极端枯水年,年降雨总量仅为 255.1 mm,并且集中在 5、6 月,7 月中旬以后降雨非常少,导致模拟结果不理想。这是由于 SWAT 模型对降雨空间变化较为敏感,尤其在降雨较少的季节模拟值偏小^[11-12]。

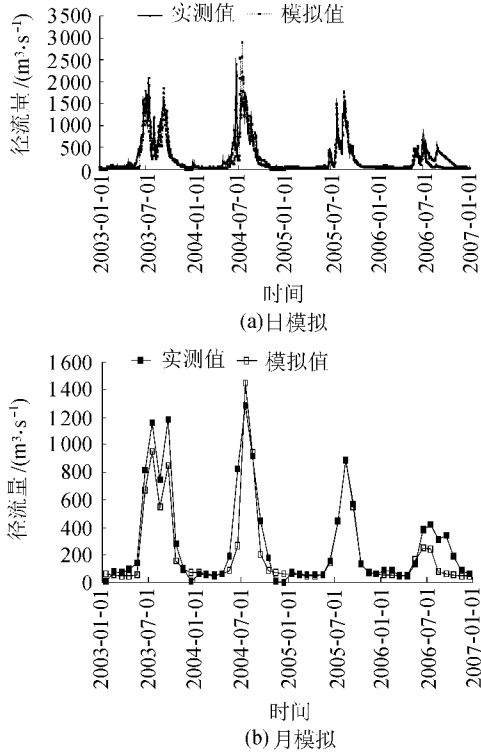


图 3 2003 ~ 2006 年月、日径流模拟值与实测值的比较

采用相关系数、模拟效率系数和均方根误差来评价两种时间尺度模拟结果的精度,结果见表 4。从表 4 可见,模拟效率系数均在 0.75 以上,达到了模型评价标准的乙等水平,说明日、月径流量的模拟值与观测值非常接近 相关系数也都在 0.8 以上,表明日、月径流量的模拟值对实测值的解释程度较高;均方根误差都在 1 以下,也同样表明了日、月径流量的模拟值与实测值的拟合度较高。

表 4 校准期和验证期模拟结果的精度评价

时间尺度	效率系数	相关系数	均方根误差
0.65	日	0.77	0.81
0.48	月	0.84	0.88

3.2 土地利用/土地覆被变化和气候波动对径流的影响

3.2.1 土地利用/土地覆被变化对径流的影响

在土地利用/土地覆被变化水文效应研究中经常运用情景设计定量分析某种或几种土地利用变化对径流量的影响。由于土地利用变化情景的设计要

充分考虑研究目的、模型类型、空间尺度、自然环境特征及社会经济热点,因此寻找理想的预测未来土地利用状况的方法存在很大困难。极端土地利用法是土地利用/土地覆被变化水文效应研究中比较常用的方法。因此,在本研究中设立了以下 4 种土地覆被情景：

- a. 从理论上假设拉萨河流域生态环境一直向恶性方向发展,草地急剧退化,土地沙化严重,地表无任何植被覆被,均为沙地和裸地。模拟时将所有农业用地、草地和林地均设为沙地或裸地类型。
- b. 2004 年的现状植被,用来对照其他 3 种土地覆被变化后的拉萨河流域径流量状况。
- c. 未来最佳土地覆被。依据 1998 年 7 月西藏自治区政府制定的西藏自治区土地利用总体规划之部门规划(1997 ~ 2010 年)。
- d. 未来采取积极的土地资源和水资源管理监督,土地朝良性方向发展,大面积草场恢复自然状态,草质良好,地表基本被林地和高密度草地覆被。

根据建立的 4 种土地覆被情景模式,分别模拟拉萨河流域 1995 ~ 2000 年共 6 a 的径流量,得出 6 a 的年均径流量,结果见表 5 和图 4、图 5。从表 5 可见,随着草地和林地面积的增加,拉萨河流域年径流量减少。模拟径流量最大值出现在地表裸露无植被覆盖情景,此时径流量比初始情景增加 10.44% 而径流量减少最多的情景是地表均被草地和林地所覆盖,此时径流量比初始情景减少 9.75%。从最佳土地覆被情景模拟的结果可以看出,目前流域的土地利用状况离最佳土地覆被还有一定的差距,说明政府还要加大生态管理措施,以使流域植被朝最佳土地覆被方向发展。对于月平均径流量而言土地覆被变化对 7、8、9 月影响较大,而对于其他季节影响很小,如图 5 所示。

表 5 不同土地覆被变化情景下的径流模拟

情景	径流量/ (m³·s⁻¹)	变化率/%	情景	径流量/ (m³·s⁻¹)	变化率/%
a	334.45	10.44	c	289.06	- 4.55
b	302.83	0	d	273.31	- 9.75

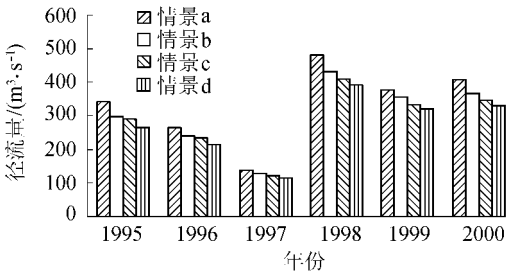


图 4 不同土地覆被情景下年径流量比较

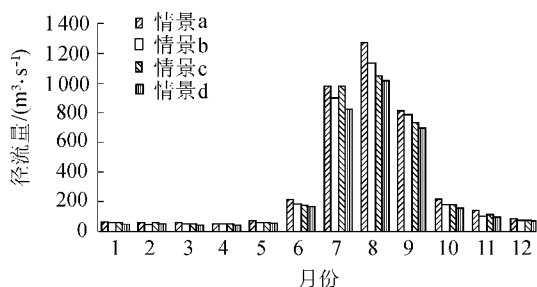


图5 不同土地覆被情景下月平均径流量

3.2.2 气候波动对径流的影响

在气候变化情景设定方面,国内外常用的有2种方法:①增量情景,即根据区域气候可能的变化,人为给定气温升高度数、降水量增加或减少比例以及两者的组合,构成气候变化的假想情景;②基于GCM(大气环流模型)输出的气候变化情景。尽管GCM模型法具有能够给出预测的气象变化过程等优点,但气候变化预测具有很多不确定性,这些不确定性主要由3种因素引起,分别是未来温室气体排放的数量、气候系统的响应和自然界的多变性。各种GCM模型对相同的CO₂增量方案,对气温和降水的预测结果差异很大,特别是对降水的增减预测有时是完全相反的结果。气候总体变化趋势表明,未来几十年内,平均气温升高,降水量会有不同程度的增减。文献[13]指出,2020~2030年,全国平均气温将上升1.7℃;到2050年,全国平均气温将上升2.2℃。同时,我国气候变暖的幅度由南向北增加。到2030年,我国西北地区气温可能上升1.9~2.3℃,西南可能上升1.6~2.0℃,青藏高原可能上升2.2~2.6℃。这一时期,我国不少地区降水出现增加趋势,东南沿海增加值最大。长江中下游地区则出现变干的趋势,华北和东北南部等地区继续变干。我国西部的冰川面积将大幅度减少,这意味着区域水资源的分配也会发生重大变化。

在以上分析的基础上采用增量情景法,设定气温和降水变化的10种情景方案,分别是:降水变化为增加原来值的+20%、-20%、+10%、-10%和不变的情况,气温变化为在原来基础上增加1℃、-1℃、2℃、-2℃和不变的情况,土地覆被采用2004年的土地覆被数据,构造24种新气候情景。对拉萨河流域1995~2000年径流进行模拟计算,得出每种气候情景相对于初始气候情景的变化百分比,得到以下结论。

a. 不同气候变化情景下年径流变化差异明显。由图6可以看出,径流减少最多的气候情景是降水减少20%、温度增加2℃时的气候变化方案,此时径流比初始条件下径流量减少45%;而径流量增加最

多的气候变化情景是降水增加20%、温度减小2℃时的气候变化方案,此时径流比初始条件下径流量增加了89%。

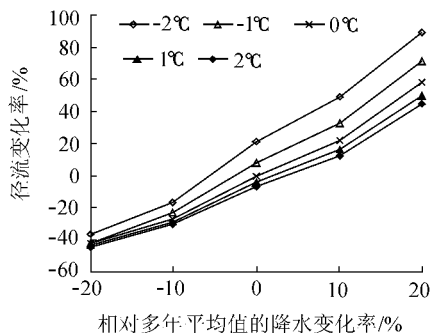


图6 径流对气候变化的响应

b. 降水对径流影响要大于温度,温度增加2℃径流减小6.7%;而降水增加10%,径流增加21.9%。这表明研究流域未来降水的变化是影响水资源变化的主要因素,而气温的增高对水资源的变化影响不是很明显。

4 结 论

模拟结果表明气候变化在流域水文过程中扮演着重要角色,尤其对径流量的影响更明显,而土地利用/土地覆被的影响甚至是极端的土地利用变化情景也是次要的。这与很多研究者在其他地区的研究结果是一致的。气候变化方面,降水变化对流域径流量的影响较大,气温影响相对小得多。径流量随降水的增加而增大,随气温的升高而减少,这是由于流域降水量增大时,水循环过程增加了流域的来水量,从而增加了径流量,而气温的升高,使流域内的蒸发量增大,在总来水量不变的情况下,径流量趋于减少。蔺学东等^[14]对拉萨河流域近50a来径流变化的趋势分析得出,近20a来径流增加趋势较显著。这些研究结论与文中设定情景模拟的结果吻合,即当温度升高且降水显著增加的情形下,流域的径流量明显增加。朱利等^[15]模拟汉江上游区水资源对气候变化的响应,陈利群等^[16]探讨黄河源区气候变化对径流的影响等研究都得出了类似的结论。

但是,笔者发现对于季节性水文过程,土地利用却起到重要的作用,从雨季(5~10月)与旱季(11月至次年4月)的径流量来看,随着土地覆被的增加,径流量的减少总量雨季所占比重较大。其中情景a的减少幅度最为显著,为29.2 m³/s,情景c和d分别为25.6 m³/s、18.8 m³/s。枯水期径流减少,但幅度不大。情景a、c、d,月径流量分别减少10.9 m³/s、1.1 m³/s、1.4 m³/s。流域降水主要集中在6~9月,期间径流的减少比较明显,情景a、c、d月径流量分别减

少 $31.2\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $36.6\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $25.1\text{ m}^3/\text{s}$ 。雨季初期和雨季末期径流减少不是很明显。因此可以认为土地覆被对汛期径流的影响较大,而对非汛期的影响则不明显,说明土地覆被的增加对雨季径流调蓄有一定作用。

参考文献：

[1] 谢国清,鲁韦坤,杨树平,等. 阳宗海、松华坝和云龙水库流域土地利用与水质变化[J]. 水资源保护,2007,23(5): 15-17,20.

[2] LEGESSE D, VALLET-COULOMB C, GASSE F. Hydrological response of a catchment to climate and land use changes in Tropical Africa :case study South Central Ethiopia[J]. Journal of Hydrology,2003,275(1-2) :67-85.

[3] TWINE T E, KUCCHARIK C J, FOLEY J A. Effects of land cover change on the energy and water balance of the Mississippi River Basin[J]. Journal of Hydrometeorology,2004,5(4) :640-655.

[4] 龚宇,邢开成,王聪玲,等. 气候变化对沧州水资源的影响与对策[J]. 水资源保护,2007,23(3) :20-23.

[5] LAHMER W, PFÜTZNER B, BECKER A. Assessment of land use and climate change impacts on the mesoscale[J]. Physics and Chemistry of the Earth Part B,2001,26(7-8) :565-575.

[6] 李弋林,徐袁,钱维宏. 近 300 年来中国西部气候的干湿变化[J]. 高原气象,2003,22(4) :371-377.

[7] CAI Y, LI D L, TANG M C. Decadal temperature changes over

Qinghai-Xizang Plateau in recent 50 years [J]. Plateau Meteorology,2003,22(5) :464-470.

[8] WEI Z G, HUANG R H, DONG W J. Interannual and interdecadal variations of air temperature and precipitation over the Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences-Chinese edition,2003,27(2) :157-170.

[9] XU Y, DING Y H, LI D L. Climatic change over Qinghai and Xizang in 21st century [J]. Plateau Meteorology,2003,22(5) : 451-457.

[10] NEITSCH S L, ARNOLD J G, KINIRY J R, et al. Soil and water assessment tool user 's manual version 2000 [J]. GSWRL Report,2002,202(02-06) .

[11] 中国科学院南京土壤研究所. 中华人民共和国土壤图 [M]. 北京 地图出版社,1978.

[12] 丁晋利,郑粉莉. SWAT 模型及其应用 [J]. 水土保持研究,2004,11(4) :128-130,156.

[13] 绍武,黄光荣. 中国西部环境演变评估 [M]. 北京 科学出版社,2002.

[14] 蔺学东,张镜铨,姚治君,等. 拉萨河流域近 50 年来径流变化趋势分析 [J]. 地理科学进展,2007,26(3) :58-67.

[15] 朱利,张万昌. 基于径流模拟的汉江上游区水资源对气候变化响应的研究 [J]. 资源科学,2005,27(2) :16-22.

[16] 陈利群,刘昌明. 黄河源区气候和土地覆被变化对径流的影响 [J]. 中国环境科学,2007,27(4) :559-565.

(收稿日期 2008-12-30 编辑 徐 娟)

(上接第 38 页)

3 结 论

a. 从 2007 年布吉河粤宝电子公司断面的水质监测结果来看,处于枯水期的布吉河水遭受了严重污染,对比布吉河人民桥断面 2002 年和 2003 年水样监测结果,除 TP 有所降低外,布吉河水质污染呈现加重的趋势。参照 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》Ⅴ类水质标准限值,进行内梅罗综合污染指数计算,布吉河水质除了 TP 内梅罗指数在 5 以下,属于重污染外,其余水质指标指数都在 5 以上,属于严重污染。其中 TN 最大达到 18.54,氮成为重要污染物,是严重的劣Ⅴ类水质。

b. 探讨了布吉河水质指标变化规律,时间间隔为 1h,经小时平均后的 COD 和 BOD 日浓度变化趋势无明显峰谷值,可生化性较好,表明布吉河水主要来源于生活污水,已经成为低浓度城市污水。NH₃-N 和 TN 的日浓度变化规律均具有很好的相似性,NH₃-N 和 TN 变化趋势有比较明显的峰谷值。TP 的日浓度变化规律与 NH₃-N 和 TN 浓度变化有很好的相似性,趋势也有较明显的峰谷值,但是与 NH₃-N

和 TN 的变化规律的峰谷值推迟 1h 左右。

参考文献：

[1] 宋继琴,陈海川,翟艳云. 布吉河流域污水截流倍数与河流水质关系研究 [J]. 中国农村水利水电,2006(8) :27-29.

[2] 张孟威,康德梦. 环境问题的数学解法及计算机应用 [M]. 北京 中国环境科学出版社,1989 :67.

[3] 刘宁,吕锐锋. 深圳河湾水污染水环境治理 [M]. 北京：中国水利水电出版社,2006 :12.

(收稿日期 2008-11-12 编辑 徐 娟)

