

# 降水对洞庭湖湿地水文补给效应

侯 鹏<sup>1,2,3</sup>, 蒋 卫 国<sup>1,3\*</sup>, 陈自力<sup>4</sup>, 罗爱民<sup>5</sup>

(1 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;

2 北京师范大学资源学院, 北京 100875; 3 北京师范大学 民政部/教育部减灾与应急管理研究院, 北京 100875;

4 湖南省民政厅, 湖南 长沙 410003; 5 承德市环境保护局, 河北 承德 067000)

**摘要:** 通过综合运用气象数据、遥感数据和典型下垫面特征资料, 采用 GIS 技术和 SCS 模型, 分析了降水对洞庭湖湿地水文的补给效应。在分析洞庭湖流域降水时空变化特征以及模拟地表径流的基础上, 计算面积补给系数和体积补给系数。结果表明, 面积补给系数较好地显示出监测时刻湖泊水域面积与流域面积之间的关系, 不仅反映了某一时刻湿地水文对补给水的依赖, 也定量表明降水形成地表径流后的水文补给效应及其对水域面积的影响; 体积补给系数则通过注入湿地中的实际水量反映出降水对湿地水文的补给作用及其对水文循环的贡献, 也可通过累加反映一段时间内的补给效应。两者的综合应用可以更好地说明大气降水对洞庭湖湿地水文的补给作用。

**关键词:** 降水; 湿地; 水文补给; 洞庭湖

文章编号: 1000-0585(2009)02-0371-08

## 1 引言

湿地水文在湿地的形成、发育、演替直至消亡的过程中起着直接而重要的作用<sup>[1]</sup>, 甚至被认为是决定各种湿地类型的形成与维持的唯一重要因素<sup>[2]</sup>。湿地生态系统的供给水源主要来自陆地水或大气降水<sup>[3]</sup>, 而陆地水主要是大气降水转化而来的, 降水通过直接方式或地表径流等间接方式为内陆湿地提供补给水源, 影响着湿地的水文过程和湿地生态系统的发育和维持。Mitsch 等的研究发现, 降水量多的区域比降水量少的区域拥有更为丰富的湿地资源<sup>[4]</sup>。面对全球湿地退化的现状, 许多学者开始探讨湿地与降水间的关系, 认为湿地降水补给不足和减少已成为湿地退化的关键因素之一<sup>[5~7]</sup>。加拿大 GCM 模型 (Canadian Center Climate Model) 和英国 HADCM 模型 (Hadley Center Model) 的预测结果表明: 21 世纪年降水量的变化将显著地改变湿地水文和水生生态系统<sup>[8]</sup>。降水对湿地水文补给的重要性, 大多出现在定性分析湿地退化因素的研究中, 而对其定量研究开展得较少。本文在利用 GIS 技术和 SCS (Soil Conservation Service) 模型分析降水时空分布特征及降水-径流关系的基础上, 分别利用面积补给系数和体积补给系数, 从不同角度分析了

收稿日期: 2008-10-06; 修订日期: 2008-12-30

基金项目: “洪泛湿地水文生态过程的防洪效应研究” 国家自然科学基金 (40701172), 北京市科技计划项目 (D08040600580801), 国际科技合作计划项目: (2007DFA20640), 对发展中国家科技援助项目和地理信息科学江苏省重点实验室开放基金资助项目联合资助。

作者简介: 侯鹏 (1978), 山东泰安人, 博士生。主要从事生态环境遥感方面的研究。E-mail: houpey@163.com

\* 通讯作者: 蒋卫国 (1976), 湖南衡阳人, 博士, 讲师。主要从事遥感与 GIS 在流域湿地洪水灾害与生态环境的应用研究。E-mail: jwg@ires.cn

大气降水对洞庭湖湿地水文的补给效应, 对进一步了解降水在湿地生态系统维持中的重要作用和洞庭湖湿地的保护与管理都具有重要意义。

## 2 数据来源与方法

### 2.1 研究区概况

洞庭湖湿地位于湖泊水网密集的长江中游, 是中国最为重要的湖泊湿地分布区。上世纪 50 年代至今, 长江中游的湖泊湿地面积从 260 万  $\text{hm}^2$  减少到不足 110 万  $\text{hm}^2$ , 减少了大约 60%<sup>[9]</sup>。70 年代以来, 西洞庭湖蓄洪能力基本消失, 南洞庭湖南移, 东洞庭湖东蚀, 调蓄功能趋向衰减<sup>[10~12]</sup>。洞庭湖素有“大水一片, 枯水一线”之称, 补给系数 105.7, 居我国湖泊之首, 且补给水有 62.9% 来自于洞庭湖流域内大气降水而形成的地表径流<sup>[13]</sup>。

### 2.2 数据收集与方法

本文收集了 2000 年洞庭湖流域内的气象数据、卫星遥感数据以及土地利用、土壤质地、土壤类型、DEM 等典型下垫面数据。其中, 气象数据主要是湖南省 23 个常规气象站的日降水量, 遥感数据选用我国 CBERS 卫星数据。鉴于洞庭湖流域的气候特点及降雨主要集中在 4~6 月份, 选取了 2000 年 2 月 26 日、5 月 14 日和 9 月 21 日三个时相的遥感数据, 分别代表该流域汛期前 (春季)、汛期 (夏季) 及汛期后 (秋季) 三个不同时期, 从而分析不同季节的大气降水对洞庭湖湿地的水文补给作用。

大气降水对洞庭湖湿地的水文补给作用主要是通过洞庭湖湿地集水区内的降水转化为地表径流而实现的。降水-径流转化过程受到流域下垫面中土壤质地类型及下渗、植被分布及长势、地形坡度、土地利用类型及人类活动强度、流域前期湿润状况等因素的影响, 而美国农业部发展的 SCS 降水-径流模型设计中综合考虑了以上因素。因此, 本文选择 SCS 模型进行洞庭湖湿地降水-径流模拟, 模型表达式为<sup>[14]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} Q &= \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)}, & P \geq 0.2S \\ Q &= 0, & P < 0.2S \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中,  $Q$  为径流量( $\text{mm}$ ),  $P$  为一次降雨的降雨总量( $\text{mm}$ ),  $S = 25400 / CN - 254$  为可能最大滞留量( $\text{mm}$ ),  $CN$  (Curve Number) 是一个无量纲参数。模型核心参数  $CN$  的确定需要综合考虑流域降水前期的土壤湿润度、坡度、土壤类型和土地利用现状等下垫面特征, 反映了下垫面对单次降水产流过程的影响。研究中  $CN$  值的确定重点考虑了土地利用类型、土壤质地和前期湿润程度。首先利用土壤质地类型和土地利用类型确定洞庭湖湿地流域的水文土壤组, 然后考虑洞庭湖流域自然条件、DEM 特征和土壤前期湿润度确定  $CN$  值<sup>[15, 16]</sup>。

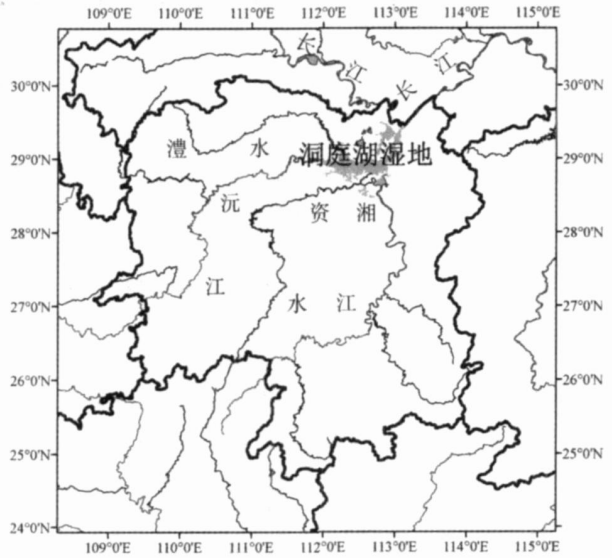


图 1 洞庭湖湿地水文补给形势图

Fig 1 Water recharge of Dongting Lake

3 研究结果与分析

3.1 大气降水时空分布特征

2000 年洞庭湖湿地流域平均年降水量为 1475.9mm, 较 1956~1997 年多年降水均值 (1447.4mm) 偏多 2.0%。湘江补给水比多年平均偏多 6.7%, 资水、沅江与多年平均基本持平, 澧水偏少 7.6%。图 2 显示了 2000 年洞庭湖流域日降水量的变化特征, 可以看出, 洞庭湖湿地流域降水量年内分配不均, 降水丰沛期 (降水量>10mm) 从 3 月开始一直持续到 11 月。

为了分析 2000 年洞庭湖流域年降水量的空间分布特征, 首先采用常规气象站的日降水量计算各站的年降水量, 然后采用 Natural Neighbor 方法对所有站点的年降水量进行插值处理, 所得结果如图 3 所示。可以看出, 2000 年洞庭湖湿地流域全年降水总量东部偏多、西部偏少。湘东幕阜山、罗霄山脉为两个高值区, 最大降水在郴州境内; 湘中衡邵丘陵新邵至冷水滩一带, 湘北洞庭湖区、湘西自治州年降水量均小于 1400mm。

3.2 湿地水文补给模拟分析

通过统计分析 2000 年洞庭湖流域日降水量变化及其分布特征, 依据水文部

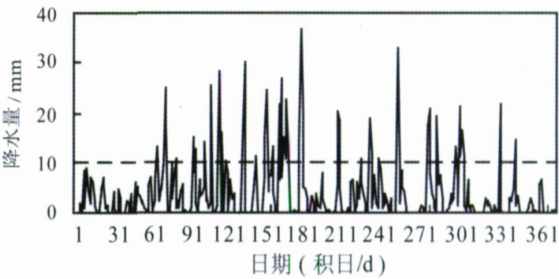


图 2 2000 年洞庭湖流域日降水量曲线图

Fig. 2 Daily precipitation in Dongting Lake basin 2000

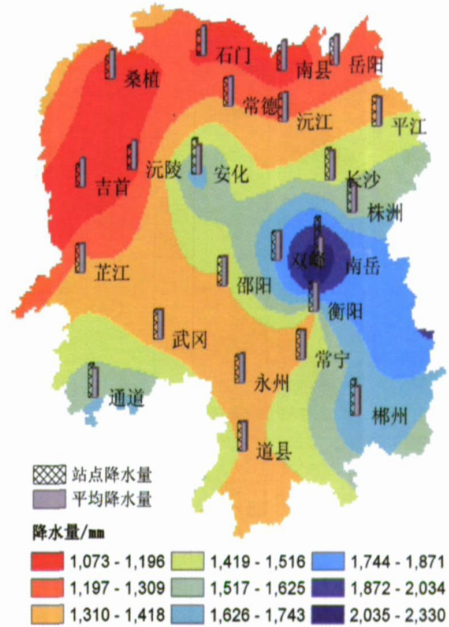


图 3 2000 年洞庭湖流域年降水总量空间分布

Fig. 3 Annual precipitation distribution

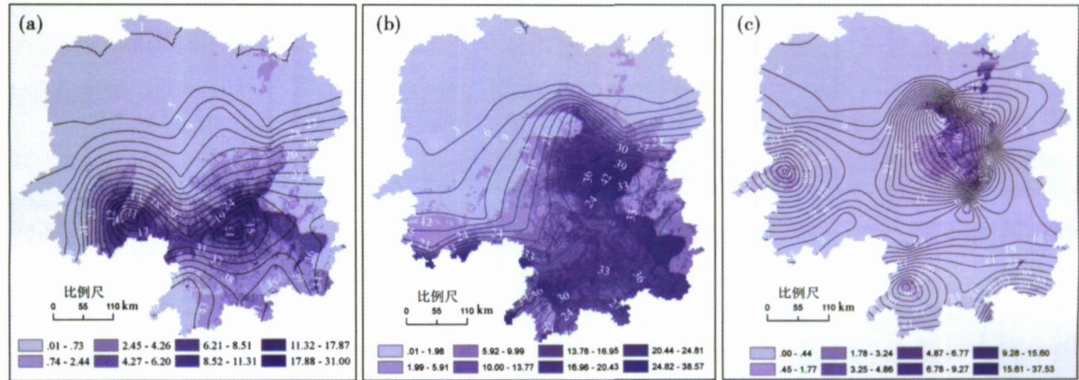


图 4 第 100 天 (4 月 9 日)、163 天 (6 月 11 日)、172 天 (6 月 20 日) 径流模拟

Fig. 4 Simulation of runoff on 100<sup>th</sup>, 163<sup>th</sup>, 172<sup>th</sup>

们对降雨量等级的划分标准,重点选择强度较大(中雨以上,即降雨量> 10mm)的降水事件,采用 SCS 模型进行降水对洞庭湖湿地水文的补给模拟分析。首先对湿地流域内 23 个气象站点的日降水资料进行插值处理,然后利用所确定的 CN 值和插值处理后的大气降水资料进行湿地水文补给模拟,结果如表 1 和图 4 所示(图 4a、b、c 分别显示了第 100、163、172 天的模拟结果)。

表 1 大气降水对洞庭湖湿地补给模拟结果  
Tab 1 Simulation of precipitation recharging the Dongting Lake wetlands

积日(d)	降雨(mm)	径流深度(mm)	积日(d)	降雨(mm)	径流深度(mm)	积日(d)	降雨(mm)	径流深度(mm)
64	13 12	0 08	116	10 24	3 40	162	22 58	10 04
69	9 89	0 24	129	17 11	0 24	163	13 65	6 51
70	25 07	3 19	130	30 10	0 58	172	14 23	0 23
71	17 62	7 09	138	10 37	0 03	173	36 82	2 32
75	9 69	2 29	139	11 17	0 04	174	19 13	12 60
78	11 00	4 94	146	15 19	0 55	201	20 06	0 56
91	14 87	1 65	147	24 50	0 65	202	18 13	0 87
93	12 53	1 55	151	13 14	4 79	218	10 98	3 88
100	13 94	1 98	156	21 74	1 75	225	18 73	1 38
105	25 30	3 41	158	26 86	1 81	226	11 98	0 11
111	28 29	1 28	160	15 15	7 51	232	10 92	5 67
113	15 77	6 69	161	10 67	4 96	246	32 97	3 59

3 3 大气降水的湿地水文补给效应

3 3 1 降水对洞庭湖湿地的补给效应分析

(1) 面积补给系数及降水补给效应分析

湖泊水文研究中,湖泊补给系数被定义为流域面积与湖泊面积的比值<sup>[17]</sup>。补给系数越大,说明湖泊的水位变化及其对流域补给的依赖性愈强。由于湖泊面积为湖泊长时间的水域面积均值,所以对于同一湖泊而言基本是一定值,无法实时地反映补给水对湖泊水文的影响。为了更好地反映大气降水对洞庭湖湿地水文的补给效应,本文将湖泊补给系数的湖泊水域面积均值用监测时刻的湖泊水域面积来代替,即流域面积与监测时刻湖泊水域面积的比值(为区别湖泊补给系数和体积补给系数,称为面积补给系数)。根据湿地公约,洞庭湖湿地为典型的湖泊湿地,洞庭湖是该湿地的核心,选择了东洞庭和南洞庭湿地为分析对象,通过分析水体的强吸收、弱反射及其随波长增长而递减的电磁波辐射特性和 CBERS 卫星 CCD 遥感数据 2、3、4 波段的灰度值(DN 值)分布范围较窄的特点,综合利用谱间关系、主成分分析方法识别提取 2 月 26 日、5 月 14 日、9 月 21 日三个时间的洞庭湖湿地水域面积,计算得其面积补给系数分别为 5459.268、5138.235、2151.153。可以看出,2 月 26 日代表的冬末春初季节(枯水期)的面积补给系数远远大于 9 月 21 日代表的夏末秋初季节(丰水期)的面积补给系数,表明了大气降水对洞庭湖湿地水文的补给作用,尤其在枯水期表现得更加明显,这是因为洞庭湖水域面积较小,降水补给的效果较明显。

图 5 显示了不同时期内洞庭湖湿地降水总量、补给总量、水体面积以及面积补给系数

的变化特征。可以看出, 2 月 26 日至 5 月 14 日, 降水强度大于 10mm 以上的总降水为 154. 54mm, 而洞庭湖湿地的水域面积增加 2 42 平方公里, 补给系数减小 321. 033。5 月 15 日至 9 月 21 日, 大气降水强度大于 10mm 以上的总降水为 378. 97mm, 而洞庭湖湿地的水域面积增加 57. 25 km<sup>2</sup>, 补给系数减小 2987. 082。可能是由于汛期大量的高强度降水较易形成地表径流, 使得洞庭湖湿地获得更为充分的水文补给, 具有更加稳定的水域面积和水文特征。

(2) 体积补给系数及降水补给效应分析

面积补给系数虽然可以较好地反映监测时刻湖泊水域面积与流域面积之间的关系, 但由于其不可以累加, 只是通过某一时刻的补给系数表示湿地水文对流域补给水的依赖性, 难以准确描述流域内地表径流对的补给作用及其对湖泊湿地水文循环过程的影响。因此, 研究中提出了体积补给系数。体积补给系数从注入湿地中的实际水量反映降水对湿地水文的补给作用。定义为:

$$K_v = V_r / V_L$$

(2)

式中,  $K_v$  为体积补给系数;  $V_r$  为地表径流量 (m<sup>3</sup>);  $V_L$  为湖泊容积 (m<sup>3</sup>), 洞庭湖容积采用 1995 年长江水委统计数据: 167×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。

通过表 1 和公式 2 计算得到洞庭湖湿地体积补给系数, 结果显示, 第 64~ 130 天之间体积补给系数之和为 48. 97, 第 138~ 246 天之间体积补给系数之和为 88. 60, 可能由于在第二阶段洞庭湖流域降水量多, 湿地的水文流动性或循环较好, 更有利于湿地与流域及湿地内部之间的物质交换和营养传递。体积补给系数与日降水量的变化趋势特征如图 6 所示, 第 64~ 130 天及第 138~ 246 天期间, 两者的升降趋势较一致,

一方面说明降水对湖泊湿地的补给作用, 另一方面说明体积补给系数对流域补给水的敏感性, 反映了一段时间内流域补给水对湿地水文过程的贡献。

因此, 面积补给系数可以表示某一时刻湿地水文对流域补给水的依赖性, 较好反映了降水形成地表径流后对洞庭湖湿地水文的补给效应及其水域面积的影响, 但是难以反映某段时间内大气降水对洞庭湖湿地水文的补给作用及其对水文循环的贡献。而体积补给系数可以通过累加来表示某段时间内流域内降水对湿地水文的补给效应, 反映过去一段时间内降水对湿地的补给效应及水文循环作用的贡献。面积补给系数愈大, 说明洞庭湖湿地对降水的依赖性愈大, 补给效应愈大; 体积补给系数愈大, 说明降水对洞庭湖湿地提供的补给

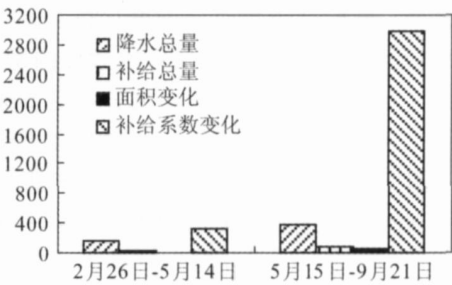


图 5 降水对面积补给系数的影响

Fig 5 The impact of precipitation on area recharge coefficient

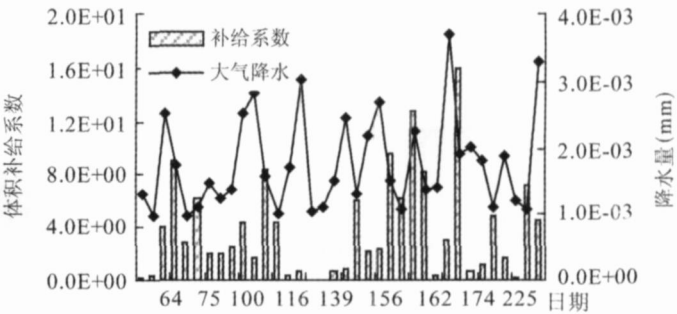


图 6 降水对体积补给系数的影响

Fig 6 Influence on volume recharge coefficient



水源愈多，补给效应愈明显，更有利于促进湿地的水文循环。

3 3 2 大气降水对湿地水文补给效应的影响因素

大气降水对洞庭湖湿地水文补给主要通过降水在地表汇集形成径流后对湿地进行水文补给而实现的，是湿地流域气候特征和下垫面条件共同作用的结果，其核心是地表径流的产流过程。因此，选择平均降水强度相近的第 100 天、163 天和 172 天的降水事件，分析了大气降水对湿地水文补给的主要影响因素。

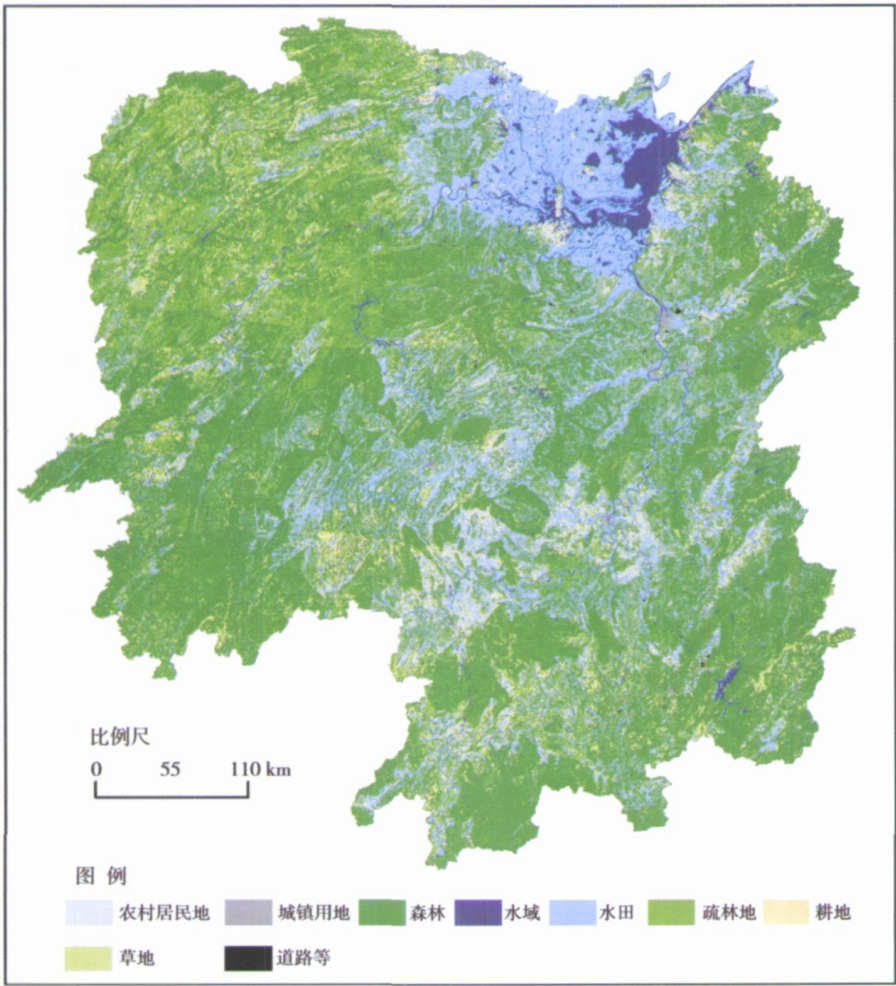


图 7 洞庭湖湿地流域下垫面特征图

Fig. 7 Underlying surface feature of in Dongting Lake basin

统计每个时间点前 5 天的总降水量分别为 18 6279、82 4786、0. 5439，根据 SCS 模型原理，第 100 天、163 天和 172 天降水前期土壤湿润等级分别为一级、二级和一级。尽管第 100 天和第 163 天的降雨强度相当，但是由于前者的湿润度小于后者，使得第 163 天的地表径流量较大（表 1）。而第 172 天和 163 天相比，前者降雨强度远大于后者，但是由于前者的湿润度远低于后者的湿润度，从而使得前者的地表径流量较小（表 1）。图 4a、

b、c 中降水强度分布和地表径流量之间表现出较好的空间一致性, 表明大气降水的空间分布特征对湿地水文补给具有决定性的作用。对比图 4a、b、c 流域降水等值线和图 7 中下垫面的类型特征, 可以看出, 在同等降水强度条件下, 东部地区由于其下垫面土壤质地为砂壤土, 渗透率相对较高, 降水转化为湿地补给水的效率较低; 在洞庭湖湿地区域, 下垫面主要为水域和水田, 降水转化为湿地补给水的效率较高。结合图 7 中的植被类型, 可以看出, 植被类型不同的区域径流特征也不相同, 可能由于植被覆盖所导致的植被截流效应不同, 致使降水转化为湿地补给水的效率也有所不同。

4 结 论

本文通过综合运用气象数据、遥感数据和典型下垫面特征资料, 采用 GIS 技术和 SCS 数值分析模型, 发展了面积补给系数和体积补给系数, 分析了大气降水对我国典型内陆湿地——洞庭湖湿地水文的补给效应。研究得出: 面积补给系数较好反映了降水形成地表径流后对洞庭湖湿地水文的补给效应, 但难以反映某段时间内降水对洞庭湖湿地水文的补给作用及其对水文循环的贡献。而体积补给系数可以弥补面积补给系数的缺陷, 不仅可以反映补给水文循环的贡献, 还可以通过系数累加反映一段时间内降水对湿地水文的补给效应。两者的综合应用可以从不同角度更好地说明大气降水形成的地表径流对洞庭湖湿地水文的影响及其补给效应。

参考文献:

[ 1 ] 邓伟, 潘响亮, 栾兆擎. 湿地水文学研究进展. 水科学进展, 2003, 14( 4 ): 521~ 527

[ 2 ] 陆健健, 何文珊, 董春富, 等. 湿地生态学. 北京: 高等教育出版社, 2006.

[ 3 ] Andrew J Baird, Robert L Wilby. 生态水文学. 赵文智, 王根绪 译. 北京: 海洋出版社, 2002 91~ 92

[ 4 ] Mitsch W J, Gosselink J G. Wetlands( third edition). New York: John Wiley & Sons, Inc , 2000 123~ 124

[ 5 ] 刘春兰, 谢高地, 肖玉. 气候变化对白洋淀湿地的影响. 长江流域资源与环境, 2007, 16( 2 ): 245~ 250

[ 6 ] 安娜, 高乃云, 刘长娥. 中国湿地的退化原因、评价及保护. 生态学杂志, 2008, 27( 5 ): 821~ 828

[ 7 ] 罗磊. 青藏高原湿地退化的气候背景分析. 湿地科学, 2005, 3( 3 ): 190~ 199

[ 8 ] Virginia Burkett, Jon Kusler. Climate change: Potential impacts and interactions in wetlands of the United States Journal of the American Water Resources Association, 2000, 36( 2 ): 313~ 320

[ 9 ] 赵学敏. 恢复扩大中国湿地. 森林与人类, 2006, ( 5 ): 5~ 7

[ 10 ] 来红州, 莫多闻, 苏成. 洞庭湖演变趋势探讨. 地理研究, 2004, 23( 1 ): 78~ 86

[ 11 ] 黄进良. 洞庭湖湿地的面积变化与演替. 地理研究, 1999, 18( 3 ): 297~ 304

[ 12 ] 吴炳方, 黄进良, 沈良标. 湿地的防洪功能分析评价——以洞庭湖为例. 地理研究, 2000, 19( 2 ): 189~ 193.

[ 13 ] 姜加虎, 黄群. 洞庭湖区生态环境退化状况及其原因分析. 生态环境, 2004, 13( 2 ): 277~ 280

[ 14 ] 袁作新. 流域水文模型. 北京: 水利电力出版社, 1990

[ 15 ] 史培军, 袁艺, 陈晋. 深圳市土地利用变化对流域径流的影响. 生态学报, 2001, 21( 2 ): 1041~ 1150

[ 16 ] 彭定志, 游进军. 改进的 SCS 模型在流域径流模拟中的应用. 水资源与水工程学报, 2006, 17( 1 ): 20~ 24

[ 17 ] 国家质量技术监督局, 国家建设部. 国家标准《水文基本术语和符号标准》( GB/ T50095- 98). 1999.

## Hydrological recharge effect of precipitation on Dongting Lake wetland

HOU Peng<sup>1,2,3</sup>, JIANG Wei-guo<sup>1,3</sup>, CHEN Zi-li<sup>4</sup>, LUO Ai-min<sup>5</sup>

(1 State Key Laboratory of Earth Process and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2 College of Resources, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3 Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, MCA & ME, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

4 Hunan Civil Affairs Department, Changsha 410003, China;

5 Chengde Municipal Environmental Protection Bureau, Chengde 067000, China)

**Abstract:** Wetlands exist in a transition zone between aquatic and terrestrial environments which can be altered by subtle changes in hydrology. Hydrological process determines the formation, development and succession of wetlands. Taking the Dongting Lake as a study area, this paper studies the hydrological recharge effect of the atmosphere precipitation. According to the meteorological data, remote sensing image and typical underlay feature data, the recharge effectivity of the rainfall on the Dongting Lake wetland is analyzed supported by GIS (geographical information system) technology and SCS (Soil Conservation Service) model. Based on the analysis of spatiotemporal feature of rainfall and modeling of the runoff of precipitation, we obtained ARC (area recharge coefficient) and VRC (volume recharge coefficient). Thus, ARC well explains the acreage relationship of watershed and that of the water area in the lake sometime. It presents not only the wetland hydrology feature depending on the recharge water, but also the recharge effect of the runoff coming from rainfall and its influence on the water area. However, it is difficult to illustrate water fluid in wetland resulting from precipitation recharge in a period. Considering the relationship between flux of rainfall-runoff and volume of lake, VRC is calculated to make up for the shortcoming of ARC. According to the model, the recharge effectivity of rainfall can be computed in a certain period. ARC, together with VRC, can better explain runoff coming from rainfall as well as how it affects Dongting Lake's hydrological process and how it recharges water to the wetland, including the water area and water cycle. Thus it is significant to realize the importance of rainfall to the wetland and to protect and manage Dongting Lake wetland.

**Key words:** precipitation; wetlands; hydrological recharge; Dongting Lake