

中国百种杰出学术期刊
中国精品科技期刊
中国科协优秀期刊
中国科学院优秀科技期刊
新中国 60 年有影响力的期刊
国家期刊奖

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

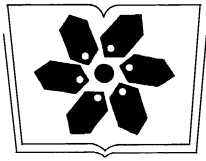
(Shengtai Xuebao)

第 31 卷 第 4 期
Vol.31 No.4
2011



中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 4 期 2011 年 2 月 (半月刊)

目 次

短期增温对青藏高原高寒草甸植物群落结构和生物量的影响	李 娜,王根绪,杨 燕,等 (895)
三峡库区 9 种植物种子萌发特性及其在植被恢复中的意义	陶 敏,鲍大川,江明喜 (906)
白蜡虫及其 3 种优势寄生蜂的时空生态位	王自力,陈 勇,陈晓鸣,等 (914)
宁夏盐池荒漠草原步甲物种多样性	贺 奇,王新谱,杨贵军 (923)
脂肪酸对中华哲水蚤摄食两种海洋微藻的指示作用	刘梦坛,李超伦,孙 松 (933)
安徽菜子湖大型底栖动物的群落结构特征	徐小雨,周立志,朱文中,等 (943)
乐清湾潮间带大型底栖动物群落分布格局及其对人类活动的响应	彭 欣,谢起浪,陈少波,等 (954)
海蜇养殖对池塘底泥营养盐和大型底栖动物群落结构的影响	冯建祥,董双林,高勤峰,等 (964)
竹巴笼矮岩羊 (<i>Pseudois schaeferi</i>) 昼间行为节律和时间分配	刘国库,周材权,杨志松,等 (972)
干热河谷植物叶片,树高和种子功能性状比较	郑志兴,孙振华,张志明,等 (982)
石羊河中游沙漠化逆转过程土壤种子库的动态变化	马全林,张德魁,刘有军,等 (989)
基于 TM 影像、森林资源清查数据和人工神经网络的森林碳空间分布模拟	汪少华,张茂震,赵平安,等 (998)
山地视觉景观的 GIS 评价——以广东南昆山国家森林公园为例	裴亦书,高 峻,詹起林 (1009)
基于功能分类的城市湿地公园景观格局——以西溪湿地公园为例	李玉凤,刘红玉,郑 因,等 (1021)
水分胁迫下丛枝菌根 AM 真菌对民勤绢蒿生长与抗旱性的影响	贺学礼,高 露,赵丽莉 (1029)
农田灌溉对印度区域气候的影响模拟	毛慧琴,延晓冬,熊 喆,等 (1038)
高大气 CO ₂ 浓度下小麦旗叶光合能量利用对氮素和光强的响应	张绪成,于显枫,马一凡,等 (1046)
豌豆过氧化氢酶在烟草叶绿体中的过量表达提高了植物的抗逆性	王凤德,衣艳君,王海庆,等 (1058)
不同小麦品种对低温胁迫的反应及抗冻性评价	王树刚,王振林,王 平,等 (1064)
基于遥感与模型耦合的冬小麦生长预测	黄 彦,朱 艳,王 航,等 (1073)
喷施 ABA 对两个穗型不同小麦穗颈节伤流、穗部性状及产量的影响	崔志青,尹燕枰,田奇卓,等 (1085)
“稻鸭共生”生态系统稻季 N、P 循环	张 帆,隋 鹏,陈源泉,等 (1093)
红壤丘陵区粮食生产的生态成本	李 晓,谢永生,张应龙,等 (1101)
甘南牧区草畜平衡优化方案与管理决策	梁天刚,冯琦胜,夏文韬,等 (1111)
黄龙钙化滩流地物种-面积关系	黄宝强,罗毅波,安德军,等 (1124)
杉木人工林细根寿命的影响因素	凌 华,袁一丁,杨智杰,等 (1130)
长白落叶松林龄序列上的生物量及碳储量分配规律	巨文珍,王新杰,孙玉军 (1139)
生物肥与甲壳素和恶霉灵配施对香蕉枯萎病的防治效果	张志红,彭桂香,李华兴,等 (1149)
北京城区不同水质水体可培养细菌数量的季节动态变化	高 程,黄满荣,陶 爽,等 (1157)
专论与综述	
整树水力导度协同冠层气孔导度调节森林蒸腾	赵 平 (1164)
植物寄生对生态系统结构和功能的影响	李钧敏,董 鸣 (1174)
加拿大一枝黄花的入侵机理研究进展	杨如意,咎树婷,唐建军,等 (1185)

农田灌溉对印度区域气候的影响模拟

毛慧琴^{1,2,4}, 延晓冬^{1,*}, 熊喆¹, 田汉勤³

(1. 中国科学院大气物理研究所全球变化东亚区域研究中心, 北京 100029; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039

3. 美国奥本大学林业与野生生物学院, 奥本 AL36849, 美国; 4. 环境保护部卫星环境应用中心, 北京 100094)

摘要:为满足人类对粮食的需求,全球灌溉农田面积迅速扩张,农田灌溉对区域气候的影响引起广泛地关注。利用区域环境系统集成模式(RIEMS2.0)和最新的土地利用变化资料,选取农田灌溉面积最大的印度区域作为研究区域,进行雨养农田和灌溉农田的对比试验,探讨农田灌溉对区域气候的影响。结果表明:(1)农田灌溉使得印度区域年平均气温降低1.4℃,年平均降水率增加0.35mm/d。农田灌溉对印度区域气候的影响存在明显的季节波动,季风前期及6月份该区域气候对下垫面变化的响应最为敏感;7—9月各气候要素变化较小。(2)农田灌溉使得印度区域地表净辐射增加,且地表净辐射在潜热通量和感热通量之间的分配发生了较大的改变,潜热通量增加,感热通量减少;对地表起冷却作用;同时由于土壤湿度增加,蒸散作用增强,大气中水汽含量增加,潜热不稳定能量增加,导致对流性降水增加。

关键词:农田灌溉; 区域气候; 模拟

Modeled impact of irrigation on regional climate in India

MAO Huiqin^{1,2,4}, YAN Xiaodong^{1,*}, XIONG Zhe¹, TIAN Hanqin³

1 Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2 Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

3 School of Forestry and Wildlife Science, Auburn University, Auburn, AL36849, USA

4 Satellite Environment Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100094, China

Abstract: In order to provide food to more than six billion people, global irrigated croplands have expanded dramatically in recent decades. The role of irrigation in modifying the regional climate has been widely recognized in recent studies. India, one of the most intensely irrigated regions of the world, was selected as the simulation experiment region to determine the impact of irrigation on regional climate. Two 11-year (January, 1990 — December, 2000) simulation experiments were conducted by using the Regional Integrated Environmental Model System (RIEMS) version 2 over Indian region: (i) Rainfed cropland (RFC) and (ii) Irrigated cropland (IGC). We discarded the first year from the January 1990–December 1990 model running as equilibration time, and reported results of the final 10 years (January 1991 — December 2000) as differences between the two cases (IGC–RFC). RIEMS2.0 uses the Biosphere–Atmosphere Transfer Scheme (BATS 1e) as its land surface process scheme. In BATES 1e root zone soil moisture is set to field capacity throughout the year in the irrigated crop area, and the soil moisture is the function of rainfall, evapotranspiration, and soil feature in other non-irrigated areas. Over the 10 year time period, the temporal difference of the two regional climate model sensitivity experiments showed that a regional irrigation cooling effect exists with annual averaged 2 m air temperature decreasing 1.4℃ and the precipitation rate increasing 0.35mm/d at the national scale. From the spatial difference of temperature and precipitation we found that the irrigation effect on climate was not only confined to the near-surface atmosphere in irrigated grid cells, but also spread to adjacent grid cells. The irrigation cooling effect can contribute to the increased latent heat flux

基金项目:国家重点基础研究发展计划资助项目(2006CB400500, 2010CB950903);国家自然科学基金资助项目(40675048);美国NASA土地覆盖和土地利用变化资助项目(NNX08AL73G_S01)

收稿日期:2010-01-11; **修订日期:**2010-03-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yxd@tea.ac.cn

and decreased sensible heat flux. The increased precipitation rate depends on the offset between the positive convective rainfall and the negative large scale none-convective rainfall. The positive convective rainfall is intrigued by the two factors that can fuel deep convection, one is added water vapor and the other is a greater latent heat fluxes that result from intensified evapotranspiration because of irrigation. The large scale none-convective rainfall decreased because of the weak divergence circulation of wind field at 850hPa which weakened the water vapor transportation from the sea to India peninsula. The results of seasonal difference indicated that the climate of pre-monsoon season and June is more sensitive than monsoon season (July to September) to irrigation. The national averaged change in temperature was 3.18°C in pre-monsoon season and 0.43°C in monsoon season, respectively. This seasonal differences can be explained by the fact that pre-monsoon season is much drier than monsoon season. During the dry season evapotranspiration difference between irrigated cropland and rainfed cropland is greater than that of the wet season. The results of this paper are limited by the BATS treatment that sets the soil moisture as a constant to field capacity throughout the year without considering about the seasonal variation of irrigation. A much more reasonable irrigation parameterization scheme is supposed to be coupled to BATS1E.

Key Words: agricultural irrigation; regional climate; simulation

在 IPCC 第四次评估报告中,科学家们一致认为人类“很可能”是气候变暖的主要原因(90%以上可能性),人类活动主要通过化石燃料燃烧和土地利用变化两种形式影响气候。人类土地利用变化通过改变大气圈和生物圈之间热量、水汽、动量的相互交换和分配,影响辐射平衡过程和水循环过程从而最终对局地、区域乃至全球的气候产生重要影响。如热带亚马逊地区的森林砍伐不仅使该地区气温升高、降水减少,还可以通过遥相关作用将热带地区的气候扰动传播到高纬地区^[1-2]。不同地理位置的土地利用变化具有不同的的气候效应^[3],如热带森林砍伐主要起增温作用^[4],而高纬度地区森林砍伐主要起降温作用^[5]增温或降温效应主要取决于反照率作用和蒸散作用的相对强弱。

土地利用变化不仅包括土地利用类型的变化,还包括土地利用管理的变化,如农田灌溉、农田免耕以及作物轮作等农田管理方式对区域以及全球气候有重要的影响^[6],特别是农田灌溉对区域的降温作用以及对水循环的影响^[6-20]。过去 200a,全球灌溉农田面积扩张迅速,1800 年,全球灌溉农田的面积约为 $8.0 \times 10^6 \text{ hm}^2$,1900 年增加至 $4 \times 10^7 \text{ hm}^2$,2000 年为 $2.7 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ^[8]。农田灌溉每年向大气输送的水汽通量(包括蒸发和蒸腾)为 2600 km^3 ,与全球因森林砍伐作用减少的水汽通量(3000 km^3)量级相当^[9]。农田灌溉和森林砍伐的共同作用促进大气中的水汽在全球尺度的重新分配,可见灌溉在全球水循环中的重要作用。全球农田灌溉用水占整个人类用水的 70%^[10]。

印度地处南亚,主要属热带季风气候,西南夏季风是影响印度气候最重要的天气系统。由于印度超过 80% 的地区其年降水量近 90% 集中在季风季节(6—9 月)^[11],少雨、干旱季节时间长,因此农田灌溉成为印度农业发展的主要管理方式。印度自 1965 年开展绿色革命以来,农田灌溉面积增加了 20 倍^[12],成为世界上灌溉农田面积最大的国家,占全球灌溉面积的 21.7%^[13],灌溉用水占全国用水的 80%—90%^[14]。印度农田灌溉对区域气候的影响引起广泛的关注,对此开展了一系列的研究,如全球尺度上,大气环流模式(GCM)的长期积分模拟试验^[6, 15-16];区域尺度上,陆面过程模式模拟研究^[17],中尺度模式的短期敏感性试验^[10]以及基于地面气象站观测资料和卫星遥感资料的观测分析^[12, 18-19];已有研究表明:农田灌溉使印度区域感热减少,潜热增加,地表气温降低,大气水汽含量增加,地下水减少,夏季风环流减弱。由于印度农田灌溉的气候效应属于区域尺度的科学问题,是土壤-植被-大气之间长期相互作用和相互反馈的结果。全球大气环流模式受其分辨率的限制在区域尺度上的模拟能力还比较低;陆面过程模式不能揭示大气-陆面之间相互反馈过程;中尺度模式的短期敏感性试验只能是对短时段内农田灌溉对特定天气过程影响的模拟和机理解释,并不能揭示其长期的气候效应,因此,采用高分辨率的区域气候模式进行长期积分模拟试验研究印度区域农田灌溉的气候

效应显得十分必要。Saeed 等^[20]采用区域气候模式 REMO 研究了农田灌溉对南亚夏季风的影响,结果表明:在陆面过程模式中若增加对灌溉过程的参数化描述,区域气候模式 REMO 对南亚夏季风有更好的模拟效果。本文在上述研究工作的基础上,利用最新的土地利用变化资料,采用较高分辨率的区域气候模式进行长时间的积分模拟,用以定量揭示农田灌溉对印度区域气候的影响。

1 模式和试验设计

1.1 模式简介

本研究所使用的模式为中国科学院大气物理研究所全球变化东亚区域研究中心近年间研制开发的区域环境系统集成模式(RIEMS2.0)。该模式对于季风亚洲区多年平均环流特征、气温和降水具有较好的模拟性能^[20-23]。在本研究中,模式的水平分辨率取 50 km,模拟区域中心位于 80°E,22°N,覆盖范围包括整个印度大陆及周边地区。模式垂直方向分 23 层,顶层高度为 50 hPa。模式中的辐射采用 NCAR CCM3 方案,陆面过程使用 BATS1e(生物圈-大气圈传输方案),行星边界层方案使用 MRF 方案,积云对流参数化方案选择为 Grell 方案。初始场和侧边界值由美国国家环境预测中心再分析资料 NCEP II 得到,侧边界场采用指数松弛边界方案,每 6h 输入模式 1 次;模式中的海温也取自 NCEP II 资料集。计算采用模式的并行版本。

1.2 试验设计

本研究设计了两个试验(表 1),雨养农田试验 RFC(Rainfed crop)和灌溉农田试验 IGC(Irrigated crop),各试验进行 1990 年 1 月 1 日到 2000 年 12 月 31 日的积分,共计 11 a,其中 1990 作为模式初始化(spin-up)时段,不做分析;为了研究试验农田灌溉对印度区域气候的影响,本文将 IGC 试验和 RFC 试验 10 年平均结果进行差异分析,并用 *t* 检验进行显著性分析。

试验 RFC 中模式区域植被采用 Ramankutty 和 Foley 潜在植被资料^[24](以下简称 R&F),并在潜在植被资料的基础上叠加 HYDE Version3.1 农田覆盖面积资料^[25-26](以下简称 HYDE);然后将叠加后的植被类型与 RIEMS2.0 陆面过程模式 BATS1e 的 18 种植被类型进行对应并投影到模式区域(图 1a),其中农田对应 BATS1e 中的雨养农田。试验 IGC 中,模式区域植被是在试验 RFC 的基础上,叠加世界粮农组织 FAO 全球水和农业信息系统(AQUASTAT)农田灌溉面积资料^[27](以下简称 GMIA)。因此该试验中农田分为两种,有灌溉的地方对应 BATS1e 中的灌溉农田,其它的为雨养农田(图 1b)。在 BATS1e 中,灌溉农田和雨养农田的主要差别是,灌溉农田区域,农作物根区土壤含水量全年设为田间持水量,雨养农田区域的土壤湿度是降水、蒸散以及土壤特性的函数,考虑渗漏和径流。各植被类型的陆表特性参数可参见 Bats1e 的说明^[28]。从图 1b 可以看出,印度的农田分布非常广阔,灌溉农田主要集中在中北部地区,全国其它地区也都有零散分布。

表 1 试验设计说明

Table 1 Description of simulation experiments

试验名称 Name	植被类型资料来源 Data source	土壤含水量 Soil moisture	积分时段 Integration time
RFC (Rainfed Crop)	自然植被:R&F 农田:HYDE	为降水、蒸散以及土壤特性的函数	1990/01/01 至 2000/12/31
IGC (Irrigated Crop)	自然植被:R&F 农田:HYDE 灌溉资料:FAO(AQUASTAT)	灌溉农田:全年保持为田间持水量; 其它植被类型:为降水、蒸散以及 土壤特性的函数	1990/01/01 至 2000/12/31

2 结果分析

2.1 对印度地区气温的影响

图 2a 给出 IGC 试验和 RFC 试验年平均气温差异的空间分布。相对雨养农田,农田灌溉使得印度区域地表年平均气温降低 1.4℃,印度北部以及东南沿海农田灌溉集中区气温显著降低(超过 95% 显著性水平),其中印度北部恒河流域地区降温幅度超过 2.5℃。可见农田灌溉对印度区域主要起冷却作用,此结论与相关研究结论相符,如 Lobell 等^[6]利用大气环流模式 NCAR CAM3 进行农田灌溉的极端理想试验表明:农田灌溉可

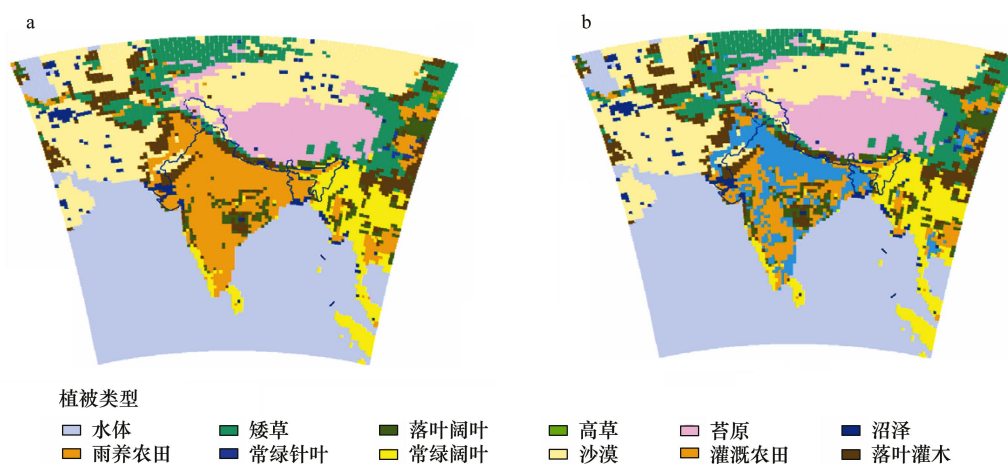


图1 各试验模拟区域植被覆盖状况

Fig.1 Land cover of simulation region for the two experiments

a: 雨养农田试验; b: 灌溉农田试验

使全球降温 1.3°C , 局地最高降温可达 8°C 。Sacks 等^[15] 同样利用 NCAR CAM3 并结合实际的农田灌溉资料进行全球模拟试验, 结果表明: 相对控制实验, 在农田灌溉区气温降低 0.06°C 。此外, 从图 2 还可以看出印度气温降低区域较农田灌溉区范围明显扩大, 说明农田灌溉不仅对局地的气候产生影响, 还会对临近地区的气候产生影响。Kueppers 等^[9] 研究北美加利福尼亚州的农田灌溉气候效应分析也表明了农田灌溉的冷却作用不仅影响当地近地层的气候, 还会对高空以及邻近地区的气候产生降温作用 (如 8 月份农田灌溉区降温 3.7°C , 整个加利福尼亚州降温 0.38°C)。

从 IGC 试验和 RFC 试验各月平均气温差异来看, 农田灌溉对印度区域气温的影响存在明显的季节波动, 5 月份降温幅度最大, 为 3.96°C ; 12 月份降温幅度最少, 为 0.43°C 。根据印度气象局关于印度季节的划分, 印度一年可以分为四季: 冬季 (1—2 月)、季风前期 (3—5 月)、季风期 (6—9 月) 和季风后期 (10—12 月), 很明显, 季风前期以及 6 月印度区域气温对下垫面变化的响应最为敏感 (平均降温 3.18°C); 季风期间 7—9 月气温变化较小 (平均降温 0.43°C)。该研究结论和观测事实较为符合, 如 Sen Roy^[12] 用印度热带气象研究所的月平均气温资料统计分析了印度西北和中北部农田灌溉区 1947 年至 2003 年气温变化趋势, 其结果表明: 印度绿色工业革命前后, 西北和中北部农田灌溉区上年 11 月至翌年 6 月存在明显的降温现象, 其中 3—6 月份降温趋势最为明显。

2.2 对印度地区降水的影响

图 2b 给出 IGC 试验和 RFC 试验年平均降水差异的空间分布, 从图中可以看出: 与气温变化类似, 农田灌溉使得印度北部以及东南沿海农田灌溉集中区年平均降水显著增加 (超过 95% 显著性水平); 降水增加区域较农田灌溉区范围明显扩大, 整个印度区域年平均降水增加 0.35mm/d , 其中对流降水增加 0.37mm/d , 大尺度降水减少 0.02mm/d 。农田灌溉对印度区域降水的影响也存在明显的季节波动, 相对于雨养农田试验, 灌溉农田试验中雨季 (7—9 月) 降水增加百分率都低于 10%, 干季 (如冬季, 季风前期) 降水增加较为明显。关于农田灌溉对区域降水影响的一系列研究^[29-33] 也表明: 农田灌溉使得土壤含水量增加, 蒸散作用增强, 区域大气中水汽含量明显增加, 从而在适当的天气条件下, 区域降水增加。如叶笃正利用简单大气环流模式进行短期的农田灌溉试验表明: 农田灌溉若位于雨带, 将使得雨带降水增强, 若位于雨带以外地区, 农田灌溉区蒸散的水汽会传播到邻近雨带区, 增强邻近地区的降水。Barnston 等^[30] 指出: 大气中由于农田灌溉增加的水汽若遇到锋面或气旋等天气系统中的辐合抬升气流, 增加的水汽被抬升到云底高度, 促进云的发展, 导致降水增加。Pielke 等的研究^[32] 也表明: 农田灌溉使得蒸散作用增强, 潜热增加, 增加的潜热使得对流有效位能 (CAPE) 增加, 再加上大气中水汽含量增加, 两者的共同作用促进深对流的发展, 从而导致对流降水增加。此

外,根据印度区域降水观测数据分析表明^[34]:1991—2000 年 10a 平均降水量相对多年平均值距平百分率为 0.6%,可见印度区域在本研究模拟时段内降水量相对多年平均值略有增加。

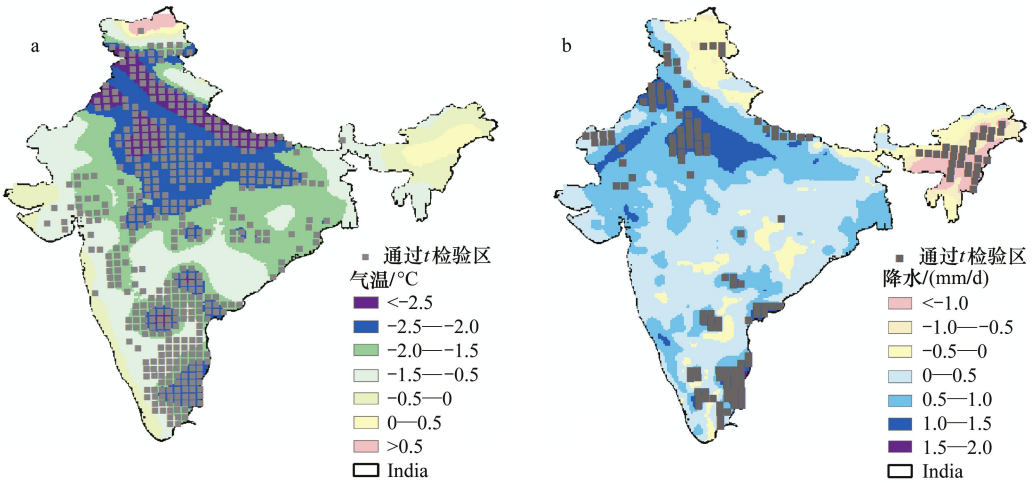


图2 IGC 试验和 RFC 试验年平均差异空间分布

Fig.2 10-year averaged difference between IGC and RFC for temperature (a) and rainfall rate (b)

图中灰色区域为 *t* 检验信度超过 95% 显著性水平的地区

2.3 对能量通量以及环流场的影响分析

农田灌溉对印度区域的气温和降水产生了显著的变化,这是陆气相互作用和大气环流发生变化的结果,表 2 中给出 IGC 试验和 RFC 试验各月及年平均潜热通量、感热通量以及净辐射通量等要素的差异。从年平均差异可以看出,农田灌溉使得地表净辐射增加,且地表净辐射在潜热通量和感热通量之间的分配发生了较大的改变,潜热通量增加(27.43 W/m^2),感热通量减少(-16.92 W/m^2),这是造成印度区域地表气温下降的主要原因,这也说明雨养农田转换成灌溉农田,地表反照率减少引起的增温作用要弱于蒸散作用增强带来的降温作用;此外蒸散作用增强,大气中水汽含量明显增加,再加上潜热不稳定能量明显增加,有利于大气不稳定,对流降水增加。从表2还可以看出:各能量通量存在明显的季节波动,如季风季节期间7—9月释放潜热

表2 印度区域年内各月 IGC 试验和 RFC 试验各要素差异

Table 2 Difference of monthly items between IGC and RFC

月份 Month	气温 Temperature /°C	降水 Rainfall /(mm/d)	对流降水 Convective rainfall /(mm/d)	大尺度降水 None- convective rainfall /(mm/d)	土壤湿度 Soil moisture /mm	蒸散 Evapotran- spiration /(mm/d)	潜热通量 Latent heat flux /(W/m ²)	感热通量 Sensible heat flux /(W/m ²)	净辐射 Net radiation flux /(W/m ²)
1	-0.63	0.07	0.05	0.03	6.23	0.58	16.84	-8.25	6.41
2	-1.38	0.17	0.14	0.03	6.73	0.99	28.54	-14.89	11.30
3	-2.46	0.17	0.15	0.02	6.97	1.50	43.40	-24.98	16.90
4	-3.22	0.12	0.13	-0.01	7.28	1.93	55.72	-35.89	18.96
5	-3.96	0.44	0.51	-0.07	7.62	2.27	65.58	-45.37	20.12
6	-3.07	1.45	1.52	-0.08	6.22	1.66	48.10	-37.64	12.92
7	-0.50	0.70	0.74	-0.06	1.54	0.48	13.95	-8.61	7.48
8	-0.21	0.45	0.45	-0.04	1.22	0.31	9.02	-5.67	4.04
9	-0.57	0.35	0.38	-0.03	2.22	0.35	10.12	-6.05	4.22
10	-0.65	0.12	0.15	-0.03	4.14	0.37	10.67	-4.80	5.25
11	-0.11	0.14	0.14	-0.00	5.81	0.42	12.27	-5.18	5.79
12	-0.06	0.05	0.04	0.01	6.50	0.52	14.93	-5.75	7.16
年 Year	-1.40	0.35	0.37	-0.02	5.21	0.95	27.43	-16.92	10.05

增加 11.3 W/m^2 , 感热通量减少 6.78 W/m^2 ; 而季风前期潜热通量增加 54.9 W/m^2 , 感热通量减少 35.4 W/m^2 。可见农田灌溉季风前期使得陆气相互作用加强, 季风期间陆气相互作用变化不明显, 原因是印度区域季风前期降水少, 气温相对较高; 季风前期季风期间降水充沛, 气候温暖; 这导致季风前期灌溉农田蒸散作用远远强于雨养农田 (蒸散量增量为 1.90 mm/d), 季风季节则由于充沛的降水使得雨养农田土壤湿度增加, 蒸散作用于灌溉农田相当 (蒸散量增量为 0.38 mm/d)。这也解释了农田灌溉对印度区域气温和降水影响的季节波动性。

从年平均 850 hPa 风场差异图上 (图 3a) 可以看出雨养农田变成灌溉农田后, 印度大陆风速略有增加, 在印度大陆上空形成一个较弱的反气旋式环流, 不利于水汽向印度大陆的输送, 然而从年平均 850 hPa 水汽混合比差异图 (图 3a) 上可以看出, 印度大陆主体上空水汽增加, 说明农田灌溉区域由于强烈的蒸散作用向大气输送的水汽超过了辐散环流的对水汽输送的不利影响。这也正好说明了农田灌溉导致印度区域降水增加的主要原因表现为: 农田灌溉导致土壤湿度增加, 蒸散作用增强, 大气中水汽含量明显增加, 再加之潜热释放促进对流有效位能的增加, 促进了对流云的发展, 从而导致对流性降水增加。此外, 从图 2 和图 3 中可以看出印度东北部孟加拉湾北部地区气温升高, 降水减少, 主要原因是该地区没有灌溉农田, 气候特征主要受大尺度环流的控制, 850 hPa 较弱的辐散环流使得该地区水汽输送减少, 降水减少; 辐散下沉气流使得地表气温上升。

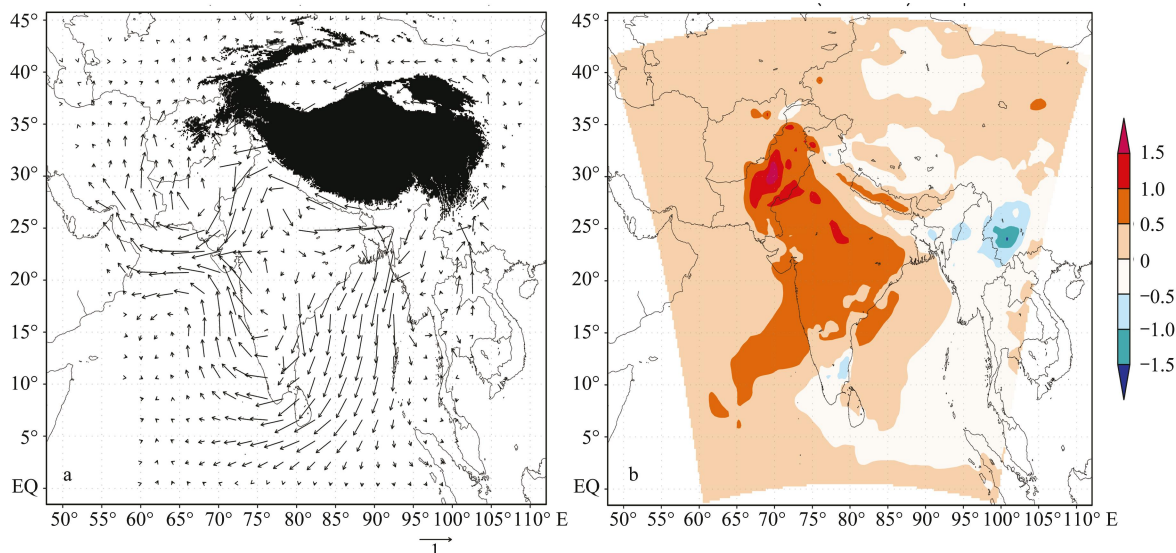


图 3 IGC 试验和 RFC 试验年平均差异空间分布

Fig. 3 10-year averaged difference between IGC and RFC

a: 850 hPa 风场 (m/s) b: 水汽混合比 (10^{-3} kg/kg)

3 结论和讨论

为满足全球 60 亿人口对食物的需求, 过去 40a 内, 灌溉农田面积增加了约 70%^[35]; 农田灌溉对区域气候的影响引起广泛地关注。本文选取世界上农田灌溉面积最大的印度区域作为研究区域, 使用区域气候模式 RIEMS2.0 和最新土地利用变化资料, 对农田灌溉引起的区域气候变化进行了数值模拟和分析, 并对试验结果进行了统计显著性检验。主要结论如下:

(1) 农田灌溉使得印度区域地表年平均气温降低 1.4°C , 年平均降水率增加 0.35 mm/d 。印度中北部以及东南沿海农田灌溉集中区是气温显著降低和降水显著增加区。农田灌溉不仅对当地的气候产生影响, 还会影响附近地区。农田灌溉对印度区域气候的影响存在明显的季节波动, 季风前期以及 6 月印度区域气候对下垫面变化的响应最为敏感; 季风期间 7—9 月各气候要素变化较小。

(2) 农田灌溉使得印度区域地表净辐射增加, 且地表净辐射在潜热通量和感热通量之间的分配发生了较大的改变, 潜热通量增加, 感热通量减少, 这是造成印度区域地表气温下降的主要原因; 同时农田灌溉使得土

壤湿度增加,蒸散作用增强,大气中水汽含量明显增加,再加之潜热释放促进对流有效位能的增加,促进了对流云的发展,从而导致对流性降水增加。

(3) 本研究采用的区域气候模式 RIEMS2.0 中的陆面过程模型为 BATS1e, BATS1e 中灌溉农田的土壤湿度设为定值即田间持水量,尚未考虑其随时间的变化,这与实际的灌溉农田存在一定的差别,然而当前国际主流的区域气候模式,如 RAMS、RegCM3、WRF 以及 REMO 等都采用相同或类似的方法;因此,区域气候模式中陆面过程的参数化问题仍是区域气候模拟相关研究中的难点。

(4) 印度位于印度季风区,印度季风作为亚洲—太平洋季风的子系统,可以通过遥相关作用影响东亚和西北太平洋季风区的气候^[36],本文的研究表明农田灌溉对印度区域大尺度环流产生影响,关于农田灌溉对印度季风的影响以及通过遥相关作用对中国以及东亚地区气候的影响研究是本研究的进一步延伸。

(5) 本文选取的印度区域是农田灌溉面积最大的典型区域。尽管农田灌溉对区域气候的影响存在明显的区域差异^[16],如灌溉农田面积不同、模拟研究中对照试验的土壤湿度不同、云对灌溉的响应特性不同等都会造成区域气候响应的差异;但是这种差异并不影响定性结论:如灌溉农田的降温作用。农田灌溉对区域降水的影响往往要复杂得多,大尺度环流往往是关键因子,因此尚需在不同的区域进一步模拟验证。

References:

- [1] Werth D, Avissar R. The local and global effects of Amazon deforestation. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2002, 107 (D20), 8087.
- [2] Chase T N, Pielke R A, Kittel T G F, Nemani R R, Running S W. Simulated impacts of historical land cover changes on global climate in northern winter. *Climate Dynamics*, 2000, 16 (2/3): 93-105.
- [3] Bounoual L, DeFries R, Collatz G J, Sellers P, Khan H. Effects of land cover conversion on surface climate. *Climatic Change*, 2002, 52 (1/2): 29-64.
- [4] Hendersonsellers A, Dickson R E, Durbidge T B, Kennedy P J, Meguffie K, Pitman A J. Tropical deforestation-modeling local-scale to regional-scale climate change. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 1993. 98 (D4): 7289-7315.
- [5] Bonan G B. Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 2008, 320 (5882): 1444-1449.
- [6] Lobell D B, Bala G, Duffy P B. Biogeophysical impacts of cropland management changes on climate. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33, L06708.
- [7] Lobell D B, Bonfils C J, Kueppers L M, Snyder M A. Irrigation cooling effect on temperature and heat index extremes. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35, L09705.
- [8] Kueppers L M, Snyder M A, Sloan L C. Irrigation cooling effect: Regional climate forcing by land-use change. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34, L03703.
- [9] Gordon L J, Steffen W, Jonsson B F. Human modifications of global water vapor flows from the land surface. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005, 102 (21): 7612-7617.
- [10] Douglas E M, Beltran-Przekurat A, Niyogi D, Pielke R A, Vorosmarty C J. The impact of agricultural intensification and irrigation on land-atmosphere interactions and Indian monsoon precipitation — A mesoscale modeling perspective. *Global and Planetary Change*, 2009, 67 (1/2): 117-128.
- [11] Basu B K. Some characteristics of model-predicted precipitation during the summer monsoon over India. *Journal of Application Meteorology*, 2005, (44): 324-339.
- [12] Sen Roy S, Mahmood R, Niyogi D, Lei M, Foster S A, Hubbard K G, Douglas E, Pielke R. Impacts of the agricultural Green Revolution-induced land use changes on air temperatures in India. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2007, 112, D21108.
- [13] Droogers P. Global Irrigated Area Mapping: Overview and Recommendations. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute, 2002.
- [14] Douglas E M, Niyogi D, Frolking S, Yeluripati J B, Pielke R A, Niyogi N, Vorosmarty C J, Mohanty U C. Changes in moisture and energy fluxes due to agricultural land use and irrigation in the Indian Monsoon Belt. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33, L14403.
- [15] Sacks W J, Cook B I, Buening N, Levis S, Helkowski J H. Effects of global irrigation on the near-surface climate. *Climate Dynamics*, 2009, 33 (2/3): 159-175.
- [16] Lobell D, Bala G, Mirin A, Phillips T, Maxwell R, Rotman D. Regional differences in the Influence of Irrigation on Climate. *Journal of Climate*, 2009, 22 (8): 2248-2255.
- [17] Rosnay P D, Polcher J P, Laval K, Sabre M. Integrated parameterization of irrigation in the land surface model ORCHIDEE. Validation over

- Indian Peninsula. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(19), 1986.
- [18] Eungul L, Thomas N C, Balaji R, Roger G B, Trent W B, Peter J L. Effects of irrigation and vegetation activity on early Indian summer monsoon variability. *International Journal of Climatology*, 2009, 29(4): 573-581.
- [19] Rodell M, Velicogna I, Famiglietti J S. Satellite-based estimates of groundwater depletion in India. *Nature*, 2009, 460(7258): 999-U80.
- [20] Saeed F, Hagemann S, Jacob D. Impact of irrigation on the South Asian summer monsoon. *Geophysical Research Letters*, 2009, (36): L20711.
- [21] Feng J M, Fu C B. Inter-comparison of 10-year precipitation simulated by several RCMs for Asia. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2006, 23(4): 531-542.
- [22] Fu C, Wang S, Xiong Z, William J G, Lee D K, John L M, Yasuo S H, Kim J W, Suh M S. Regional climate model intercomparison project for Asia. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2005, 86(2): 257-266.
- [23] Xiong Z, Fu C B, Zhang Q. On the ability of the regional climate model RIEMS to simulate the present climate over Asia. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2006, 23(5): 784-791.
- [24] Ramankutty N, Foley J A. Estimating historical changes in global land cover: Croplands from 1700 to 1992. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, 13(4): 997-1027.
- [25] Goldewijk K K. Estimating global land use change over the past 300 years: the HYDE database. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, 15(2): 417-433.
- [26] Goldewijk K K, Ramankutty N. Land cover change over the last three centuries due to human activities: The availability of new global data sets. *GeoJournal*, 2004, 61(4): 335-344.
- [27] Siebert S, Doll P, Hoogeveen J, Faures J M, Frenken K, Feick S. Development and validation of the global map of irrigation areas. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2005, 9(5): 535-547.
- [28] Dickinson R E, Henderson-Sellers A, Kennedy P J. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) Version 1e as Coupled to the NCAR Community Climate Model. NCAR Technical Note, NCAR/TN-387 + STR, 1993.
- [29] Yeh T C, Wetherald R T, Manabe S. The effect of soil-moisture on the short-term climate and hydrology change — a numeric experiment. *Monthly Weather Review*, 1984, 112(3): 474-490.
- [30] Barnston A G, Schickedanz P T. The effect of irrigation on warm season precipitation in the southern Great Plains. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1984, 23(6): 865-888.
- [31] Segal M, Pan Z, Turner R W, Takle R W. On the potential impact of irrigated areas in North America summer rainfall caused by large-scale systems. *Journal of Applied Meteorology*, 1998, 37(3): 325-331.
- [32] Pielke R A. Influence of the spatial distribution of vegetation and soils on the prediction of cumulus convective rainfall. *Reviews of Geophysics*, 2001, 39(2): 151-177.
- [33] Boucher O, Myhre G, Myhre A. Direct human influence of irrigation on atmospheric water vapour and climate. *Climate Dynamics*, 2004, 22(6/7): 597-603.
- [34] Guhathakurta P, Rajeevan M. Trends in the rainfall pattern over India. *International Journal of Climatology*, 2008, 28(11): 1453-1469.
- [35] Foley J A, DeFries R, Asner G P, Barford C, Bonan G, Carpenter S R, Chapin F S, Coe M T, Daily G C, Gibbs H K, Helkowski J H, Holloway T, Howard E A, Kucharik C J, Monfreda C, Patz J A, Prentice I C, Ramankutty N, Snuder P K. Global consequences of landuse. *Science*, 2005, 309: 570-574.
- [36] Ding Y H, Liu Y Y. A study of the teleconnection in the Asian-Pacific monsoon region. *Acta Meteor Sinica*, 2008, 66(5): 670-682.

参考文献:

- [36] 丁一汇, 刘芸芸. 亚洲-太平洋季风区的遥相关研究. *气象学报*, 2008, 66(5): 670-682.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 4 February, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

Short-term effects of temperature enhancement on community structure and biomass of alpine meadow in the Qinghai-Tibet Plateau	LI Na, WANG Genxu, YANG Yan, et al (895)
Effects of submergence on seed germination of nine annual plant species in the Three Gorges Reservoir region and their implication to vegetation restoration	TAO Min, BAO Dachuan, JIANG Mingxi (906)
Temporal-spatial niches of Chinese White Wax Scale insect (<i>Ericerus pela</i>) and its three dominant parasitoid wasps	WANG Zili, CHEN Yong, CHEN Xiaoming, et al (914)
Species diversity of carabid beetles in desert-steppe in Yanchi of Ningxia, China	HE Qi, WANG Xinpu, YANG Guijun (923)
Identification of trophic relationships between marine algae and the copepod <i>Calanus sinicus</i> in a fatty acid approach	LIU Mengtan, LI Chaolun, SUN Song (933)
Community structure of macrozoobenthos in Caizi Lake, China	XU Xiaoyu, ZHOU Lizhi, ZHU Wenzhong, et al (943)
The community distribution pattern of intertidal macrozoobenthos and the responses to human activities in Yueqing Bay	PENG Xin, XIE Qilang, CHEN Shaobo, et al (954)
The effects of jellyfish (<i>Rhopilema esculentum</i> Kishinouye) farming on the sediment nutrients and macrobenthic community	FENG Jianxiang, DONG Shuanglin, GAO Qinfeng, et al (964)
Diurnal activity rhythm and time budgets of the Dwarf Blue Sheep (<i>Pseudois schaeferi</i>) in Zhubalong Nature Reserve	LIU Guoku, ZHOU Caiquan, YANG Zhisong, et al (972)
Comparison of leaf, height and seed functional traits of species in dry-hot valleys	ZHENG Zhixing, SUN Zhenhua, ZHANG Zhiming, et al (982)
Dynamics of soil seed banks in the reversion process of desertification in the middle reaches of the Shiyang River	MA Quanlin, ZHANG Dekui, LIU Youjun, et al (989)
Modelling the spatial distribution of forest carbon stocks with artificial neural network based on TM images and forest inventory data	WANG Shaohua, ZHANG Maozhen, ZHAO Pingan, et al (998)
The GIS-based visual landscape evaluation in mountain area: a case study of Mount Nan-kun National Forest Park, Guangdong Province	QIU Yishu, GAO Jun, ZHAN Qilin (1009)
A functional classification method for examining landscape pattern of urban wetland park: a case study on Xixi Wetland Park, China	LI Yufeng, LIU Hongyu, ZHENG Nan, et al (1021)
Effects of AM fungi on the growth and drought resistance of <i>Seriphidium minchinense</i> under water stress	HE Xueli, GAO Lu, ZHAO Lili (1029)
Modeled impact of irrigation on regional climate in India	MAO Huiqin, YAN Xiaodong, XIONG Zhe, et al (1038)
The responses of photosynthetic energy use in wheat flag leaves to nitrogen application rates and light density under elevated atmospheric CO ₂ concentration	ZHANG Xucheng, YU Xianfeng, MA Yifan, et al (1046)
Enhanced drought and photooxidation tolerance of transgenic tobacco plants overexpressing pea catalase in chloroplasts	WANG Fengde, YI Yanjun, WANG Haiqing, et al (1058)
Evaluation of wheat freezing resistance based on the responses of the physiological indices to low temperature stress	WANG Shugang, WANG Zhenlin, WANG Ping, et al (1064)
Predicting winter wheat growth based on integrating remote sensing and crop growth modeling techniques	HUANG Yan, ZHU Yan, WANG Hang, et al (1073)
Effects of spraying ABA on bleeding intensity in neck-panicle node, spike traits and grain yields of two different panicle-type winter wheat	CUI Zhiqing, YIN Yanping, TIAN Qizhuo, et al (1085)
Nitrogen and phosphorus cycling from rice-duck mutual ecosystem during late rice growth season	ZHANG Fan, SUI Peng, CHEN Yuanquan, et al (1093)
Initial exploration of the ecological costs of food production in the hilly red soil region of Southern China	LI Xiao, XIE Yongsheng, ZHANG Yinglong, et al (1101)
Optimization strategy and management decision-making in balancing forage and livestock in Gannan pastoral area	LIANG Tiangang, FENG Qisheng, XIA Wentao, et al (1111)
Species-area relationship in travertine area in Huanglong valley, Sichuan	HUANG Baoqiang, LUO Yibo, AN Dejun, et al (1124)
Influencing factors of fine root lifespans in two Chinese fir plantations in subtropical China	LING Hua, YUAN Yiding, YANG Zhijie, et al (1130)
Age structure effects on stand biomass and carbon storage distribution of <i>Larix olgensis</i> plantation	JU Wenzhen, WANG Xinjie, WANG Xinjie (1139)
Effects on controlling banana Fusarium wilt by bio-fertilizer, chitosan, hymexazol and their combinations	ZHANG Zhihong, PENG Guixiang, LI Huaxing, et al (1149)
Seasonal dynamics of culturable bacterium numbers in freshwater bodies of different water quality in Beijing	GAO Cheng, HUANG Manrong, TAO Shuang, et al (1157)
Review and Monograph	
On the coordinated regulation of forest transpiration by hydraulic conductance and canopy stomatal conductance	ZHAO Ping (1164)
Impacts of plant parasitism on structure and function of ecosystems	LI Junmin, DONG Ming (1174)
Invasion mechanisms of <i>Solidago canadensis</i> L.: a review	YANG Ruyi, ZAN Shuting, TANG Jianjun, et al (1185)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊*

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任: 孔红梅

执行编辑: 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 31 卷 第 4 期 (2011 年 2 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 4 2011

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许可证	京海工商广字第 8013 号		

