

土地利用变化对水资源影响研究的现状和趋势

李昌峰^{1,2} 高俊峰^{1,2} 曹 慧³

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所 南京 210008; 2. 中国科学院研究生院; 3. 中国科学院南京土壤研究所)

摘 要 水资源是关系到人类生存和发展的具有战略意义的自然资源, 水资源问题已经威胁到了全世界的安全。本文阐述了土地利用变化对水资源影响研究的重要性, 以及土地利用变化对水资源量、质和空间分布影响研究的现状, 并分析了当前土地利用变化对水资源影响研究中存在的问题及今后的研究趋势。

关键词 土地利用变化; 水资源; 水文响应; 现状; 趋势

水是生命之源, 是支撑全球社会经济系统发展不可替代的资源。但是, 由于全球变化、人类活动的负面影响, 地球上的水循环在发生变化, 许多地区正在发生严重的水问题与危机^[1]。水资源问题已在较大程度上影响了地区社会经济的发展, 成为社会经济可持续发展的一个制约因素。联合国《世界水资源综合评估报告》指出^[2]: 水问题将严重制约 21 世纪全球经济与社会的发展, 并可能导致国家之间的冲突。就我国而言, 近年来北方和一些沿海地区水资源供需矛盾日益尖锐, 黄河流域出现经常性断流; 南方水资源本来相对丰富, 但由于污染严重, 水质型缺水日益加剧; 西北干旱半干旱区, 河道断流, 终端湖干涸, 下游天然植被大面积退化, 向沙漠化发展。全国 666 座大中型城市中, 近 400 座城市存在不同程度的缺水, 其中严重缺水的达 110 多座。淡水资源人均占有量的相对不足和持续下降将构成我国 21 世纪经济可持续发展的重要的制约因素。

土地是一种生态系统, 人类对土地的利用, 必然会在不同方面对其产生影响, 进而对依附于土地的生态系统及其环境产生作用。随着全球环境变化研究的深入开展, 土地利用/土地覆盖变化成为目前全球研究的热点和前沿问题。水文过程机理比较复杂, 它不仅与陆地表层系统中各种自然地理要素的时空分布密切相关, 而且对农业开发、都市化等土地利用及其变化有高度的敏感性及相关性, 国际上研究机构都把土地利用变化的水文响应作为全球变化的重要研究内容之一。目前的研究结果表明^[3]: 在较长时间尺度上, 气候变化对水资源的影响更加明显, 但在短期内, 土地利用变化是水文变化的主要驱动要素之一。由于社会经济发展, 人类活动改变了水循环自然变化的空间格局和过程, 加剧了水资源形成与变化的复杂性。土地利用/覆盖变化对水资源的影响包括水量、水质和空间分布的变化。人类耕作中化学肥料和杀虫剂的使用、城市生活污水和工业废水引起的土地利用/覆盖变化已造成了世界性的水污染; 大面积的森林开采、过度放牧、开荒毁林和围湖造田增加了下游洪水泛滥的频率和强度, 改变了每年的河流流量, 并使得降水的再分配不平均。目前,

淡水生态系统最严重的压力来自于流域的改变和利用以及人类造成的水资源的污染^[4]。因此,研究土地利用对水资源的影响就显得尤为重要,迫在眉睫。

1 目前的研究进展

1.1 土地利用变化对水资源量的影响

1.1.1 农业用地对水资源量的影响 农业用地包括农、林、牧、渔用地。在其它类型保持不变,水田改作旱地、非耕地,产水量会增加;水面改为水田或旱地,产水量会减小。原因是:汛期是水稻生长的季节,水稻会消耗水量,同时水田也可以调蓄水量,水田面积减少会增加产水量;水面一方面除蒸发外直接产流,另一方面可以作为调蓄面积,从产水量上来说,减少水面积,产水量是增加的^[5]。

在许多流域内,森林的开采(特别是高地上的森林)增加了下游洪水泛滥的频率和强度,一般会增加每年河流的流量,使得降水的再分配不平均,并且不同程度地增加了流域的产水量^[6]。原因是:林冠及枯枝落叶层有更高的降雨拦截率,其下土壤的渗透率也比较高;林冠使空气运行的路径更加粗糙,引起空气动力的变化,使水分的蒸腾率升高;树木的根系能从更深的土壤层中吸取水分,近地表土壤的产流可能会减少,且由土壤浅表层下渗到潜水层的水也会减少。另一方面,森林的破坏将使更多的土壤暴露在降雨之下,水分下渗会因裸露土壤的板结而减少,发生暴雨时会加剧流域的产流,地下水的补给量也比植被覆盖状态良好的情况下少^[7]。同时森林面积减少还引起水土流失,导致湖泊沉积量的增加,蓄水能力下降^[8]。

草地、草原等牧业用地的变化也有以上类似的效果。

以流域为单元,研究农业土地利用变化对水文过程的影响,受到水文研究工作者的广泛重视。英国^[9]、美国^[10,11]、澳大利亚^[12]等国家进行了大量研究,其共同点是强调了流域植被类型和土地利用结构与水行为要素间的关系。国内也开展了类似的研究^[13]。其基本结论是流域产水量随植被覆盖的减少而增大。目前,世界上很多土地利用变化对区域水文过程产生明显影响的例子表明^[14]:近几十年的土地利用变化,使水系格局发生变化,并引起产水量、洪峰和洪涝持续时间的变化。在东亚地区以土地利用/覆盖变化为突出标志的人类活动,在过去 3km²,60%以上的自然植被转变为农田,草地转为半荒漠,并发生大面积的土地退化。由于土地利用/覆盖变化,使地表反照率、粗糙度、植被叶面积指数和地表植被覆盖度发生了明显的改变,弱化了夏季风,并强化了冬季风,从而进一步导致了干旱化的过程。在南美洲亚马逊河流域,土地利用变化不仅反映了热带雨林森林的退化,同样导致了气候条件的变化,其突出的表现为气候系统的不稳定,导致水旱灾害的发生频繁增加,流域生态安全水平大大下降^[6]。

1.1.2 建设用地对水资源量的影响 建设用地增加了不透水层的面积,使地表径流系数增大,径流量增加,其面积增加会增加流域的产水量。以太湖流域为例,太湖流域土地利用变化的主要特点是耕地面积的减少和建设用地面积的增加。同样降雨类型,1996 年流域下垫面状况下的产水量比 1986 年的多 $10.18 \times 10^8 \text{m}^3$ 。太湖流域土地利用变化对流域产水量有较大影响,这与 20 世纪 90 年代以来太湖持续高水位的现象相吻合^[15]。

1.2 土地利用变化对水资源水质的影响

1.2.1 农业用地对水资源水质的影响 土地利用/覆盖变化对水文(地表水和地下水)的

影响不仅包括产水量和洪涝灾害方面,而且对流域的水质也有很大的影响。随着农业生产的发展,土地利用结构发生了很大的变化,如部分洼地或水稻田被挖掘或整理为鱼塘。在耕地内部调整过程中,流域内水系遭到破坏,部分河流被填埋,丧失或改变了原有的生态功能,影响了水系之间的正常水体和养分交换,降低了水环境容量和对污染物的稀释吸纳能力,间接地导致了水环境的恶化。如长江中下游浅水湖泊区,历来就是人类活动最频繁的場所之一。人类环湖而居,湖泊在较长一段时间内受到了人类活动的干扰。经过近几十年来的围垦、人工调控,使得湖泊水质环境普遍恶化,部分经济发达区湖泊已危及到经济的可持续性发展^[16]。

由于农业人口数量的增加而造成的人口压力,加上经济利益的驱动和生活方式的转变,农业从业人员在耕作时大量使用化肥农药。随着流域内化肥农药使用量的不断增加,流域内农业非点源营养物质的排放将保持持续上升的势头。如在太湖流域有机肥与化肥的使用比例已由 80 年代中期的 3:7 发展为 90 年代中期的 1:9,每公顷农田施化肥 577.5kg,施农药 37.5kg,远高于全国平均水平的 411.0kg 和 11.25kg。农田水体中 N、P、K 的含量明显增高,化肥的使用成为水体富营养化的主要面源^[17],由于湖泊营养内负荷量大,以至于营养外源负荷源控制后,湖泊水环境的改善仍很缓慢。在荷兰,水环境中来自农田的 N、P 的负荷分别占 60%和 50%左右^[18],而美国 60%以上的地表水环境问题是 由农业活动引起的^[19]。

同时,随着集约化畜禽养殖业的大规模发展,大量的饲养场傍河湖而建,废水直接排放入河湖。据统计^[17],江苏省苏锡常三地畜禽养殖业就超过了一个 1500 万人口城市生活排污的总量。水产养殖中大量使用鱼饵,增加了水体的有机含量,也加速了水体的富营养化过程。

1.2.2 建设用地对水资源水质的影响 随着工业化和城市化的快速发展,引起城市居民的急剧膨胀,土地利用结构发生了很大的变化,大量的土地转化为城市建设用地。城市化导致的城市用地快速扩展是发展中国家(如中国的沿海地区和长江三角洲)近 20 年来土地利用变化的主要方式^[20]。如在滇池流域,1988~2000 年期间,水田面积减少了 2.94%,减少的大部分水田变成了城镇用地,耕地减少了 70.69km²,有 64.76 km²变成了城镇用地,占 91.6%^[21]。

由城镇化引起的土地利用/覆盖变化所产生的城市污水已造成了世界性的水污染。如在长江中下游地区,由于工业化、城市化迅速发展和人口的剧增,排入湖泊的营养物质大量增加,使湖泊生态系统结构改变,功能下降,富营养化进程加速,引起一系列严重的环境问题。仅以太湖流域为例。近 20 多年,太湖流域城镇化进程十分迅速,1999 年城市化水平为 51%,远高于全国 31%的水平,城镇化土地面积扩大了 2800km²,占平原土地面积的 10%,工业、生活污水量也从 1987 年的 36×10⁸t 增加到 1994 年的 49×10⁸t,为流域多年平均水资源量的 1/3^[17]。太湖受到了越来越重的污染。水中溶解氧在减少,化学耗氧量和氨氮在增加,富营养化急速发展。60 年代,太湖流域基本保持山青水秀的良好状态,太湖水质为 I~II 类,处于清洁~较清洁状态,人口增值慢,经济发展水平低,人类活动对湖泊水环境处于有限干预阶段;70 年代,乡村工业发展,污水排放量增大,人口数量大幅度上升,城市建设用地发展较快,太湖水质为 II 类,这时人类活动对湖泊水环境处于干预-弱制约阶段;80 年代,出现第三个生育高峰,小城镇快速发展,耕地大量转为城市建设用地,太湖水质平均 II~III 类,人类活动处于干预-制约型阶段;90 年代,人口增长速度趋缓,

但人口总量不断增加,经济快速发展,城镇化用地与交通基础设施建设加快,太湖水质为 III~IV 轻污染,局部 V 类重污染,人类活动处于干预-强制约型阶段^[22]。

1.3 土地利用变化对水资源空间分布的影响

1.3.1 土地利用对水量空间分布的影响 土地利用/覆盖变化会导致流域上下游水量空间分布和产流持续时间的变化。如植被的破坏,使水量在河流的上下游或干支流上的分配趋向于极端化,产流主要集中在暴雨过后的几天内,导致上游或支流水量减少,而下游或干流则水量过大或者发生洪涝灾害。其原因是:地表覆盖可能因自然因素而改变,如因长期的气候变化或气候的持久不变(如连续多年不断的干旱),或自然界发生的偶然事件(如火灾或者洪水)。但是,绝大多数土地覆盖的变化都是由人类通过地表覆盖物的转化或改良而造成的,主要目的是为了农业生产和居住。土地利用及其管理的表现形式,通过加强或者通过抑制渗透过程,会对水文过程产生显著影响,从而减少或者加快暴雨量的产生,造成水资源量空间分布上的变化。局部土地利用突变对水资源的影响远比区域性或全球性地表覆盖物的渐变要重要的多。如根据在南非的研究表明^[17]:尽管野火仅仅毁坏了一个流域较低处有林的 26.5%,但是火灾后紧接着的 10 个月中,此流域的暴雨流量比统计预计值增加了 92%,高峰排放量增加了 1100%,到达洪峰值的时间减少了 53%。

另外,工业化、城镇化的快速发展和人口的增加促使人类向水滨湿地的扩展,破坏了水滨湿地雨水的贮存和对水流的缓冲作用,土壤持水能力下降,使洪水调蓄能力降低或被彻底破坏,洪峰增高,持续时间缩短。引起了一系列的负面水文效应,增大了区域的洪涝灾害的程度和损失。如在英国的研究实例表明^[23],湿地破坏使洪峰增高了 1.0~1.5 倍,持续时间缩短了 7h。

土地利用变化也能导致水分循环的变化,进而影响水量在空间分布上的变化。如在黄土高原地区,水土保持工作正在向较大尺度的区域范围扩展,植被建设和土地利用结构调整已经、也将更加对河川径流和区域水循环产生较大的影响。植被增加、作物高产、梯坝地建设有增强水分小循环,减弱水分大循环的作用,但深入的定量化研究尚需进一步开展。

1.3.2 土地利用对水质空间分布的影响 土地利用/覆盖变化通过影响洪水流量流速的变化,进而影响点源污染和面源污染的扩散规律,减缓或者放大了污染的扩散,影响了水质的空间分布。一般来说,洪水的稀释降解使污染物浓度会随流量增加而减小,随流量的减小而增大。这是因为,洪水泛滥的时候,由于水流较大,且有许多旋流,水流的自净能力很大。流域内植被破坏后,发生暴雨时,支流或上游的污染物很快地排放到干流或者下游中,造成了干流或者下游的水质迅速恶化,而上游或者支流的污染程度则有所减轻,暴雨过后,上游或者支流的水质恶化程度又迅速增加。东北东辽河流域开发较晚,但人类的土地利用活动已破坏了水资源可持续的地域耦合空间结构和流域和谐的生态水文过程,河流水质污染严重,受农业季节性开发活动的影响,东辽河流域污染重心的季节变化较之年际变化更为剧烈,从全年变化趋势看,污染重心有向流域上游迁移的趋势^[24]。

水坝的建设是土地利用/覆盖变化对水质空间分布影响的又一个重要因素。如在埃及,阿斯旺大坝建成后,尼罗河的水文情势发生了变化。由于进行流量控制,使每年冲洗尼罗河的机会受到了很大的限制,造成污染得不到稀释和减缓。在高坝建成的 1968 年前,尼罗河水的水化学情势与现在不同,那时各种盐类的浓度在每年特定时间内变化,可分别观测到最小值和最大值。而这种变化在高坝运行后不复存在,其浓度在整个 1 年内接近不变^[25]。

2 目前研究中存在的问题

1. 目前虽然土地利用对水资源影响研究做了很多的工作,但由于研究的主体、角度、方法、目的等的差异,系统地评价土地利用变化及其对水资源影响尚存在一定的问题:土地利用变化研究较多的是监测和对比分析,较多采用静态方式,考虑了不同类型、不同建设阶段植被对环境要素的影响,在区域土地利用动态变化对区域水资源的影响方面研究比较薄弱,对于区域土地利用变化的机制研究有待深入。同时由于众多研究之间缺乏严密的时空可比性,所以截止目前还不能形成土地利用变化对区域水资源影响的完整清晰认识。研究的空间尺度较多地集中于径流小区、自然坡面和小流域等方面,同时由于众多点状研究中普遍没有得到空间连续数据(如土地利用图、遥感影像等)的支持,致使研究结论不能适于较大尺度的区域。

2. 纵观已经取得的研究成果,对土地利用某种类型的变化导致水文过程的变化研究较多(如城市用地扩展增加了不透水层面积,使洪涝过程缩短,洪峰增高),但对于土地利用类型的组合变化对水文过程的影响研究较少。区域土地利用的格局是由各种用地类型组合而成,不同土地利用类型的此消彼长,在流域上、下游的空间分布有差异,与水系格局的联系各有不同,这些都会影响到水文过程。目前这方面的研究成果还不多见,即使偶尔有这方面的成果,但由于土地利用和水文过程的区域性极强,也难有普遍的指导意义。土地利用变化的水文反应如果伴以任何气候方面的短期或长期变化就会更加复杂^[7],由于气候变化与土地利用变化的组合对水文过程影响研究的复杂性,这方面的研究进展不大。

3. 现在的一些研究没有选择区域内多个地区多年降雨资料,将降雨类型类似年份的径流量进行对比;没有说明各水文站控制的区域土地变化情况和土地利用类型的流向;没有根据长系列土地利用资料,将土地利用划分阶段,分析在不同降雨频率下、不同土地利用阶段的水文效应,以及土地利用类型空间格局的变化(如上下游、圩内外、山区平原)对水文过程影响的差别。另外降雨产流是一个十分复杂的问题,前期降雨量多少、连续降雨和间断降雨、雨强、降雨频率等都会对水文和洪涝过程产生影响,这些方面也没有结合土地利用来考虑。

4. 关于土地利用变化对区域水文过程影响的定量化研究,必须充分考虑其影响因子的空间变化和分异。为此 GIS 技术得到了广泛应用。如荷兰学者基于 GIS 开发的流域水文与土壤侵蚀模型 LISEM,可以估算次暴雨过程中流域任意一点的径流量和土壤侵蚀量^[26]。在众多单点或地块尺度研究的基础上,从点到面(如小流域及更大区域)的尺度转换虽已引起了普遍的关注,并在一些方面取得了重要进展。但是作为一个世界性的难题,尺度转换问题仍然没有得到很好的解决。由于地理区域和水文过程的复杂性,这些研究在不同地区的研究深度也有所不同。目前,土地利用变化对水资源影响的效应评价,理论和方法均未完善,现有研究还不能反映不同尺度上土地利用变化对水资源的影响。

3 今后的研究趋势

1. 随着系统分析方法及信息技术的深入发展和应用,对水资源的评价和分析方法不断改进和完善,向着综合化、精确化和定量化方向发展。土地利用系统部分或整体动态模拟模型和资源信息系统的建立与发展,将会使土地资源的系统综合研究更加科学化和定量化。

2. IGBP (国际地球 - 生物圈计划) 的核心项目 (GAIM、BAHC、GCTE、LUCC) 中都强调将模拟水文及土地利用变化作为核心内容^[7]。土地利用变化的水文响应是目前国际上研究的热点问题之一, 这种变化将直接影响到流域水资源分布、洪涝灾害, 以及流域管理和社会经济的可持续发展。阐明水文过程对土地利用类型变化的响应, 定量分析土地利用类型变化对径流、洪水和水资源的空间分布的影响将是今后一段时期内的主要研究方向。

3. 一个区域内局部地块或小流域治理效益明显, 但整个区域山河依旧的问题, 仍困扰着研究者。考虑地块、小流域及区域尺度与不同时间的关系, 对植被重建的区域水文效应的定量化研究是极其重要和必要的, 今后的研究将会更多的侧重不同尺度土地利用变化对水文过程影响。

4. 土地利用对水资源影响的研究领域涉及到水文学、自然地理学、遥感与地理信息系统等学科, 多学科的交叉研究也是今后研究的一个重点。

参 考 文 献

- 1 夏军, 谈戈. 全球变化与水文科学新的进展与挑战. 资源科学, 2002, 24(3): 1~6
- 2 汪党献, 王 浩, 马 静. 中国区域发展的水资源支撑能力. 水利学报, 2000, (11): 21
- 3 Vörösmarty C J., Green P., Salisbury J., Lammers B R. Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. Science, 2000, (289): 284~288
- 4 刘昌明, 陈志凯. 中国水资源现状评价和需求发展趋势分析. 北京: 中国水利水电出版社, 2001, 42~45
- 5 高俊峰, 闻余华. 太湖流域土地利用变化对流域产水量的影响. 地理学报, 2002, 57(2): 194~200
- 6 Richey J E., Nobre C., Deser C. Amazon River discharge and climate variability: 1903~1985. Science, 1989, (246): 101~103
- 7 Roland E. Schulze. Modelling Hydrological Responses to Land Use and Climate Change: A Southern African Perspective. Ambio, 2000, 29(1): 13~17
- 8 高俊峰, 张琛等. 洞庭湖冲淤变化与空间分布. 地理学报, 2001, 56(4): 269~277
- 9 Eles C W O., Blackie J R. Land-use changes in the Balquhider catchments simulated by a daily stream flow model. Journal of hydrology, 1993, 145(3~4): 315~336
- 10 Arnold J G., Allen P M. Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds. Journal of hydrology, 1996, 176(4): 57~77
- 11 Goodrich D C., Lane L J., Shillito R M et al. Linearity of basin response as a function of scale in a semiarid watershed. Water Resources Research, 1996, 33(12): 2951~2965
- 12 Meng F R., Bourque C P A., Jewett K et al. The Nashwaak Experimental watershed project: analyzing effects of clear cutting on soil temperature, soil moisture, snow pack, snowmelt and stream flow. Boreal forests and global change. Water, Air and Soil Pollution, 1995, 82(2): 363~374
- 13 黄明斌, 康绍忠, 李玉山. 黄土高原沟壑区森林和草地小流域水文行为的比较研究. 自然资源学报, 1999, 14(3): 226~231
- 14 史培军, 宋长青, 景贵飞. 加强我国土地利用/覆盖变化及其对生态环境安全影响的研究. 地球科学进展, 2002, 17(2): 161~168
- 15 高俊峰. 太湖流域洪涝灾害对土地利用变化的响应. 自然资源学报, 2002, 17(2): 150~156
- 16 许刚, 朱振国等. 无锡市社会经济发展对水环境的影响. 湖泊科学, 2002, 14(2): 166~170
- 17 林泽新. 太湖流域水环境变化及缘由分析. 湖泊科学, 2002, 14(2): 112~116

(下转第 205 页)

区典型样地的土壤性质的空间分布格局；通过对等值线图的实地分析，可以从宏观上把握影响太湖流域丘陵区土壤肥力质量演变的主要因素，这对于认识太湖丘陵区土壤质量的演化规律，防止土壤肥力退化和养分流失具有重要的现实意义。

参 考 文 献

- 1 Vieira SR, Hatfield JL, Nielson DR and Biggar JW. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. *Hilgardia*, 1983, 51, 1~75
- 2 Trangmar BB, Yost RS and Wade MK. Spatial variation of soil properties and rice yield in recently cleared land. *Soil Soc. Am. J.*, 1987, 51: 668~674
- 3 Warrick AW and Nielson DR. Spatial Variability of soil physical properties in the field. In: *Applications of soil physics*, Hillel D(ed.). Academic Press, London, 1980, 319~344
- 4 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999
- 5 Tsegaye T and Hill RL. Intensive tillage effects on spatial variability of soil test, plant growth, and nutrient uptake measurement. *Soil Sci.*, 1998, 163: 155~165
- 6 Yost RS, Uehara G and Fox R L. Geostatistical analysis of soil chemical properties of large land areas. I. Semivariograms. *Soil Soc. Am. J.*, 1982, 46: 1028~1032
- 7 Chien YJ, Lee DY and Guo HY. Geostatistical analysis of soil properties of mid-west taiwan soils. *Soil Sci.*, 1997, 162: 291~298
- 8 陈灵芝, 黄建辉, 严昌荣. 中国森林生态系统养分循环. 北京: 气象出版社, 1997
- 9 Glendinning MJ. 130 years of inorganic nitrogen fertilizer applications to broadbalk wheat experiment: The effect on soil organic nitrogen. *Trans., 14th ICSS*, 1990, 4, 4~8
- 10 鲁如坤. 土壤磷素在利用过程中的消耗和积累. *土壤通报*, 1980, (5): 6~8
- 11 赖庆旺. 红壤性水稻土连续施肥的生物效应和肥力特征. 见: 林葆等主编: 长期施肥的作物产量和土壤肥力的变化. 北京: 中国农业科技出版社, 1996, 60~68

(上接第 196 页)

- 18 Boers P C M. Nutrient emission from agriculture in the Netherlands : causes and remedies . *Water Sci Technol* , 1996 , 33 : 183 ~ 190
- 19 Tim U S. , R Jolly . Evaluation agricultural nonpoint—source pollution using integrated geographic information systems and hydrologic/water quality model . *Environ Qual* , 1994 , 23(1) : 25 ~ 35
- 20 杨桂山. 长江三角洲近 50 年耕地变化及其驱动机制研究. *自然资源学报*, 2001, 16(2): 111 ~ 117
- 21 郑丙辉, 鄧永宽, 郑凡东, 李子成. 滇池流域生态环境动态变化研究. *环境科学研究*, 2002, 15(2): 16 ~ 17
- 22 谢红彬, 陈雯. 太湖流域制造业结构变化对水环境演变的影响分析——以苏锡常地区为例. *湖泊科学*, 2002, 14(1): 53 ~ 58
- 23 Coulthard T J, Macklin M G. How sensitive are river systems to climate and land-use changes? A model-based evaluation . *Journal of Quaternary Science* , 2001 , 16 (4) : 347 ~ 351
- 24 严登华, 何岩, 邓伟, 王春梅. 东辽河流域地表水水质空间格局演化. *中国环境科学*, 2001, 21(6): 564 ~ 568
- 25 方子云. 阿斯旺高坝兴建后尼罗河的水质变化及其管理. *人民长江*, 1995, 26(4): 60
- 26 De Roo A P J. , Wesseling , Ritseman C J. LISEM : A Single-Event Physically Based Hydrological and Soil Erosion Model for Drainage Basins I : Theory , Input and Output . *Hydrological Processes* , 1996 , (10) : 1107 ~ 1118