

# 喀斯特地区水土流失遥感监测现状与发展趋势

杨胜天<sup>1</sup>, 王冰<sup>2</sup>, 王玉娟<sup>2</sup>

(1. 北京师范大学 地理学与遥感科学学院, 北京 100875; 2. 北京师范大学 环境学院, 北京 100875)

**摘要:** 水土流失已成为全球最严重的环境问题之一。总结了喀斯特地区水土流失遥感监测的现状, 结合目前水分能量平衡在不同地区生态系统中的研究现状, 提出了今后喀斯特地区水土流失监测的研究应着眼于水分能量平衡角度, 并在此基础上进行了喀斯特地区水分能量野外观测初步实验研究, 为进一步开展喀斯特地区的水土流失监测和水土保持工作提供了一个新的思路 and 方向。

**关键词:** 喀斯特地区; 水土流失; 遥感监测; 发展趋势

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2007)01-0062-05

中图分类号: X830.5

## Trend and State of RS Monitoring of Soil and Water Loss in Karst Region

YANG Sheng-tian<sup>1</sup>, WANG Bing<sup>2</sup>, WANG Yu-juan<sup>2</sup>

(1. School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Soil and water loss is one of the most serious environmental problems. It is important to monitor soil and water loss in karst region because of the fragility of its eco-environment. The applied status of methods for soil and water loss monitoring in karst region is summarized after studies of water balance and energy balance in different regions and different ecosystems. It is presented that the balance between substance and energy is the new subject of soil and water loss monitoring in karst region. Accordingly, primary field observations in Guizhou karst region were made, which provide soil and water conservation with a new thought and a method.

**Keywords:** karst region; soil and water loss; RS monitoring; trend

喀斯特环境问题已成为当代国际地学研究的热点之一。全世界岩溶分布面积约占陆地面积的 15%, 主要分布在欧洲中南部、北美东部和中国西南地区, 其中, 中国西南地区的喀斯特以分布面积最大、发育最强烈、生态环境最脆弱而著称。该区碳酸盐岩出露面积  $4.26 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 主要集中在滇、黔、桂 3 省, 其中贵州省分布面积最大, 为  $1.30 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 占全省面积的 73%。

中国西南喀斯特地区, 地质条件脆弱性大、敏感度高, 再加上不合理人为活动的影响, 致使生态环境严重退化, 水土流失加剧, 出现了大面积基岩裸露的喀斯特“石漠化”问题, 同时造成了特殊的“喀斯特贫困”现象。据统计, 到 21 世纪初, 滇、黔、桂 3 省的水土流失面积达  $1.80 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 占土地总面积的 40.1%<sup>[1]</sup>。大面积的水土流失不但使环境条件恶化, 也使农业减产, 泥沙进入河流, 洪水灾害加剧, 岩石裸露面积不断扩大<sup>[2]</sup>。要尽快治理水土流失, 改

善生态环境, 必须对水土流失的发生、发展、流失量、流失速度等进行监测, 及时掌握水土流失的现状、动态变化规律, 才能进行合理的水土保持规划, 采取有效的水土保持措施, 实现区域的生态恢复。由于喀斯特环境存在地貌“二元结构”和土壤成土速度缓慢等特征, 使喀斯特地区的水土流失情况有其独特性, 即水土流失过程和石漠化过程紧密相连, 因此, 喀斯特地区水土流失的监测更应该着眼于生态环境的基本动力过程, 借鉴其它地区生态环境监测的成功经验, 从水分能量循环的角度开展监测工作。

## 1 水土流失遥感监测现状

长期以来, 世界各国开展了许多有关水土流失的研究和实际应用工作。特别是 20 世纪 80 年代后期, 遥感和地理信息系统技术广泛应用于水土流失调查与监测中, 极大地推动了水土流失研究和水土保持工作。我国喀斯特地貌分布广泛, 因而, 我国学者对于

收稿日期: 2005-08-20

修稿日期: 2006-08-20

资助项目: 国家重点自然科学基金(40335046); 国家自然科学基金(40271055)

作者简介: 杨胜天(1965—), 男(汉族), 博士, 教授, 主要从事自然地理、遥感和环境科学研究。E-mail: yangshengtian@bnu.edu.cn。

通讯作者: 王冰, 硕士研究生, E-mail: wbingbing2008@126.com。

喀斯特地区的水土流失研究较为深入。纵观遥感和地理信息系统技术在我国喀斯特地区水土流失监测中应用的发展历程,将其方法概括为目视解译法、人机交互式解译法和人工智能法 3 大类。

### 1.1 目视解译

目视解译(Visual Interpretation)是一种较早期的遥感信息获取、解读方式,是“判读者通过直接观察或借助判读仪器(放大镜、立体镜、密度分割仪和彩色合成仪等)研究地物在遥感图像上的各种影像特征(如形状、大小、灰度、彩色、阴影、图形结构),并通过地物间的相互关系推理、分析,达到识别所需地物信息的过程”<sup>[3]</sup>。我国在“六五”,“七五”期间进行的多项大尺度区域环境资源调查均使用了目视解译方法,并在第一次、第二次全国土壤侵蚀遥感调查中得到了很好的应用<sup>[4]</sup>,为我国水土保持、环境监测及国土整治提供了宏观基础数据。

在喀斯特地区的水土流失监测中,目视解译方法也得到了广泛的利用。李双岱、李兴中以黑白航空照片对跳登河(猫跳河支流)流域土地资源开发强度和喀斯特发育强度的判译为依据,提出了喀斯特地区水土流失目视解译的地质地貌条件<sup>[5]</sup>;安裕伦等按照水电部划分土壤侵蚀强度和水土流失潜在危险程度的统一标准,利用卫星影像结合其它资料对贵州省水土流失状况进行了解译,并在此基础上,阐述了贵州省不同级别水土流失强度分布状况、水土流失潜在危险程度及水土流失强度分区,分析了贵州高原水土流失产生的自然背景与影响因素<sup>[6]</sup>;杨传明利用 TM 图像对广西岩溶石漠化分布特征和形成条件进行遥感综合分析,通过不同时相的 TM 图像进行对比,查明了岩溶石漠化的萎缩原因<sup>[7]</sup>。

目视解译方法存在着主观性、非定量性、效率低等特点,但通过实际的应用已经比较成熟,在遥感技术不断高速发展的今天,它仍会与其它遥感信息提取方法共同存在,在水土流失研究工作中仍然有许多潜力有待进一步挖掘。

### 1.2 人机交互式解译法

人机交互式解译法是在 GIS 软件支持下,由经验丰富的专业人员对计算机储存的遥感信息和人所掌握的知识、经验进行推理、判断提取信息的过程,是一种人脑和电脑相结合的工作方法<sup>[8]</sup>,它既吸取了计算机的优点,又充分利用了目视解译的原理和方法,并将目视解译中工作人员的主观差异降低到了最低程度。人机交互式解译的过程,就是利用 GIS 软件中图层的模式,通常会与通用土壤流失方程(USLE)等土壤侵蚀模型相结合,分别建立土壤侵蚀

影响因子(如土地利用、地形坡度、植被状况等)的图层,最后通过解译人员的综合判断得出土壤侵蚀信息,通常采用 TM 影像作为遥感信息源。

人机交互式解译方法在大尺度土壤侵蚀遥感调查中发挥了积极的作用。在我国喀斯特地区,人机交互式解译方法的应用比较广泛。周中发等采用人机交互的判读分析方法,根据 1996 年的 TM 影像,在野外调研基础上与 GIS 技术支持下,叠加相应的土地利用图、地形图、坡度图、水文地质图等,分析了石漠化类型、植被覆盖度、地表组成物质等状况,制作了贵州清镇的石漠化动态图,并进行了石漠化的分类分级探讨<sup>[9-10]</sup>;在分析贵州典型喀斯特环境主要因子关系的基础上,杨胜天、朱启疆用土地覆盖、植被状况和土壤属性来反映喀斯特环境退化与自然恢复过程,应用遥感和地面观测方法对研究区土地覆盖、植被覆盖、生物生产量、生物多样性和土壤理化性质等指标进行了研究,最终得出了研究区喀斯特环境退化与自然恢复规律及其相应速率<sup>[11]</sup>,并以贵州省内 17 个小流域的河流输沙模数和土壤侵蚀影响因子资料,通过灰色相关和统计相关分析,获取了贵州省土壤侵蚀和土壤侵蚀影响因子的非结构性知识,利用人机交互式解译方法提取了贵州省的土壤侵蚀信息<sup>[12]</sup>;此外,兰安军<sup>[13]</sup>,胡宝清等也采用人机交互式方法分别对贵州<sup>[14]</sup>、广西喀斯特地区的石漠化、土壤侵蚀等生态问题进行了研究。

人机交互式解译方法已经成为遥感、地理信息系统技术在水土流失监测等实际应用中的一条主要途径。人机交互式解译是建立精确土壤侵蚀遥感信息提取模型的基础,它的出现已经在从目视解译到计算机自动解译的道路上迈出了坚实的一步。

### 1.3 人工智能法

人工智能法是通过记录土壤侵蚀领域专家对典型区域土壤侵蚀遥感信息的识别过程,建造区域土壤侵蚀地学知识库,并用它对全区域进行土壤侵蚀信息的自动提取的方法<sup>[15]</sup>,它完全将人脑知识融于电脑中,是监测大尺度水土流失快速、可靠的有效工具。该方法不同于常规的专家系统,更加符合地学认知过程中空间性强的特点,基本克服了机器学习的“瓶颈”问题,与人机交互式解译方法相比有了质的提高,并且具有客观性、可重复性和高效性的优点。杨胜天等通过构建知识库,建立了土壤侵蚀的智能化信息提取模型,以人机交互式解译的土壤侵蚀图作为检验的标准图件,监测了贵阳市 1991, 1994 和 1998 年的土壤侵蚀状况,不仅进一步证明了人工智能法的有效性,还揭示了贵阳市土壤侵蚀的动态变化情况;并在此基

础上进行了土壤侵蚀危险程度评价和空间分析,比较客观地反映了研究区的土壤侵蚀危险程度,为贵阳市城市水土保持工作提供了新的信息资料,对开展城市水土保持工作具有重要意义<sup>[12]</sup>。

## 2 水土流失遥感监测的发展趋势

通过以上研究可以得出,目前对喀斯特地区水土流失的遥感监测已经进行了大量的研究工作,也取得了很大的进展,但是这些研究一般是通过一些经验公式或模型进行各个影响因子的分析,从而获取水土流失信息。然而水土流失作为一个典型的地表过程,它与物质能量的循环有着密切的内在联系。

### 2.1 国内外水分能量平衡的研究进展

水分能量平衡是研究气候形成和变化机制的重要问题,也是维持现有生态系统平衡以及退化生态系统恢复的关键。国内外很多学者针对不同地区、不同生态系统的水分能量平衡规律进行了分析研究,如对农田、森林、干旱系统内部的研究已非常成熟。根据每个生态系统内研究角度的不同,可以大体分为水量平衡与水文动态、能量平衡 2 个方面。

2.1.1 水量平衡与水文动态研究 在气候、水文和水资源管理等研究领域,水量平衡的研究已显示出越来越重要的地位。水量平衡的研究具有十分现实的意义,通过对研究区水量平衡的研究,可以确定研究流域的水资源量,为其优化配置提供依据;可以分析地区洪涝、干旱等灾害的成因,为抵御这些自然灾害提供对策;还可以还原天然的水文过程,为具有物理基础的区域气候、水文模型的研究提供基础资料<sup>[16]</sup>。

对于各个生态系统中水分循环、水分平衡方面的研究一般都经历了一个从单因子定量如树冠截流、蒸散、土壤水分、降水、径流等到水量平衡总体定量的过程。(1) 森林生态系统深入的定量研究始于 20 世纪 90 年代。在国外, D Whitehead<sup>[17]</sup>, S J Tajchman<sup>[18]</sup> 分别进行了水量平衡、水热平衡规律的研究;我国学者则从不同角度对不同类型森林生态系统的水量平衡规律进行了研究<sup>[19-20]</sup>。(2) 农田生态系统水分平衡的研究方面, Wegehenkel 提出了 THESEUS 系统模型,解决了水量平衡过程中大气与地表水热传输、交换的耦合问题<sup>[21]</sup>;我国对农田生态的水量平衡研究始于 20 世纪 80 年代,龚元石、李保国建立了农田水量平衡模型,研究了农田土壤水分变化规律<sup>[22]</sup>。(3) 在荒漠生态系统中对水量平衡和水分循环的研究,包括从定性到定量分析,短期与长期调查观测以及对系统水分的模拟预测,主要集中在影响因素(如植被类型、降水、蒸散发、土壤水分、土壤性质等)对它

的贡献大小的研究,很多学者在这方面也取得了相应的成果<sup>[23-26]</sup>。

2.1.2 能量平衡规律研究 太阳辐射作为地表的能量源,到达地表后,部分用于植物的光合作用,部分以显热和潜热的形式返回到大气中,土壤—植被—大气系统内部这种能量和物质的传输转化过程控制着作物生长的微气候环境,对作物产量的形成有重要影响;地表的热量通量及动量通量也决定了边界层内湍流及扩散的强度和稳定度,并且控制着平均风、温度和湿度的变化<sup>[27-28]</sup>。

生态系统的水分循环和能量循环是密切联系的,水分循环中的蒸散发过程即如此。能量平衡规律的研究,同时有助于对气候及水分循环的理解。

(1) 德国是最早对森林热量平衡进行系统研究的国家,如 A Baumgartner, G Mitcherlich, H Mayer 和 G Flemming 等<sup>[21]</sup>。此外,美国、原苏联、日本、法国、加拿大等国都对森林热量平衡及其各子过程(太阳辐射、土壤蒸发、植物蒸腾等)进行了系统研究。我国对森林热量平衡的定量化研究始于 20 世纪 80 年代,90 年代后,其研究方法呈现多样化,研究更趋成熟<sup>[29]</sup>。

(2) 农田生态系统热量平衡研究方面,首先是对蒸散量和蒸散模型的研究<sup>[30-32]</sup>,我国对农田蒸散量的研究主要集中在干旱区和半干旱地区<sup>[33-35]</sup>;另外,各国还对农林复合系统中农田蒸散问题进行了研究;其次,波文比热量平衡法的应用研究也较多,如李胜功等<sup>[30]</sup>、杨晓光等分别探讨了农田生态系统热量平衡、辐射平衡的各分量特征<sup>[31]</sup>。

(3) 干旱区不同荒漠类型条件下的能量平衡方面,我国学者主要针对西北干旱地区沙漠和绿洲的地面辐射能和热量分配、热平衡方面进行了研究<sup>[36, 21]</sup>。

### 2.2 喀斯特地区水土流失监测的发展方向

通过以上对国内外水分能量平衡研究进展的分析,可以看出,对于各个生态系统的水分能量平衡方面的研究理论和方法都已较为成熟。我国学者已经从不同角度对喀斯特地区的水土流失问题进行了研究,却仍基于表观现象和经验模型的基础上。水分和能量是生态系统存在的源泉和动力,它们决定着生态系统的演化和一切生态现象的发生、发展;同时,生态系统的水分循环和能量循环是密切联系的,如地表与大气圈的水分交换过程和热交换过程是分不开的,因此,作为下垫面变化表现之一的水土流失,其过程实际上就是物质能量转化的过程,更加需要从其发生、发展的根本原因来研究,只有将水分循环和能量循环结合起来,才能从整体上把握该地区的水土流失状况。因此,从水分能量平衡的角度对水土流失监测进

行研究必将成为其未来的发展方向。

喀斯特地区水土流失监测的目的,是要了解在喀斯特地区脆弱的生态环境条件下,水土流失的特点、现状和发展趋势,摸清水土流失发生、发展的原因,从而将退化生态系统不平衡的水分和能量状况通过各种措施手段和方法使之平衡,从根本上抑制水土流失的进一步恶化。所以从这一层意义上来说,水分能量循环是水土流失研究工作的理论基础。只有充分了解喀斯特地区的水分和能量平衡状况,从过程机理方面把握水土流失发生、发展过程中的水分、能量转化规律,才能准确地获取该地区的水土流失状况。

综上所述,从物质能量的角度来看,将该方面已经取得的一些成果应用于喀斯特地区的水土流失监测研究之中,将会使水土流失监测的研究和认识有新的突破。

### 3 喀斯特地区水分能量实践研究

#### 3.1 喀斯特地区土壤水分模型研究

土壤水分是生态环境中水分存在的主要形式之一,是喀斯特生态环境脆弱区生态恢复的主要限制因子,是水分能量平衡分析中的重要因素,因此,了解该地区不同时段下的土壤水分运动规律,对在喀斯特地区应用水分能量平衡方法监测水土流失有着重要的指导作用。

以贵阳市为实验点,杨胜天、田雷建立了适合喀斯特地区土层薄<sup>[37]</sup>、地下水影响微弱、漏水严重等特点的宏观尺度模型——土壤水分均衡模型,并对模型进行了实测数据检验,结果显示,模拟值与实测值一致性较好,在50 d的模拟时段内模拟精度为65%~95%,可以用于喀斯特生态环境变化中土壤水分运动过程转化分析。

#### 3.2 喀斯特地区野外实验研究

根据水土流失监测的发展方向,于2004年7月22—29日,对贵州典型的喀斯特地区——红枫湖小区进行了土壤水分变化规律的野外实验研究。研究区中心位于26°32'N,106°24'E,海拔1259 m左右。实验利用高精度土壤水分测量仪AZS-2,分别对研究区的草地、灌丛和玉米田土地利用类型的土壤水分变化规律进行了观测。实验观测前,研究区经历了降雨过程,各样点的田间持水量基本达到饱和,观测时间于降雨停止后进行,观测时间间隔为白天2~3 h。

通过实验表明,在喀斯特地区,不同的土地覆盖类型对土壤水分的保持能力差异较大,对从水分能量角度开展的水土流失进行监测具有一定的借鉴作用。

## 4 结 论

我国学者已经从不同角度、运用不同方法对喀斯特地区的水土流失监测进行了研究,却仍基于表观现象和经验模型的基础上,缺乏一定的过程机理研究,因此存在着一定问题。(1) 目视解译法存在着主观性、非定量性、效率低等特点,但在水土流失监测研究中仍然有许多潜力有待进一步挖掘;(2) 人工交互式解译方法既吸取了计算机的优点,又充分利用了目视解译的原理和方法,仍处于自动提取信息的初级阶段;(3) 人工智能方法与人机交互式解译中的人脑与电脑的结合方式相比有了质的提高,具有客观性、可重复性和高效性的优点,但仍具有未能从水土流失发生、发展的根本原因上进行把握的不足。

目前,各个生态系统的水分能量平衡方面的研究理论和方法都已较为成熟,针对喀斯特地区特有的环境地质特点,今后喀斯特地区的水土流失遥感监测的研究方向应着眼于水分能量平衡,从过程机理方面来深入研究喀斯特地区的水土流失,寻求其发生、发展的根源,准确获取水土流失信息。这一发展趋势的提出,为进一步开展喀斯特地区的水土流失监测提供了一个新的思路 and 方向,也为全国水土保持工作的开展开辟出了一条新的道路。

结合喀斯特地区水土流失遥感监测的发展方向,已在贵州喀斯特地区开展的水分能量野外观测初步研究,也为如何将水分能量平衡的理论和方法综合地应用到喀斯特地区的水土流失监测工作,提供了一个很好的借鉴。

#### [参 考 文 献]

- [1] 王世杰. 喀斯特石漠化——中国西南最严重的生态地质环境问题[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 2(2): 120—126.
- [2] 陈旭. 感技术监测土壤侵蚀[J]. 北方环境, 2004, 29(2): 59—61.
- [3] 陈述彭. 遥感大辞典[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [4] 水利部水土保持监测中心. 全国土壤侵蚀遥感调查与监测系统研制分阶段实施方案. 1999.
- [5] 李双岱, 李兴中. 从航片判译对清镇县跳登河流域水土流失特点的探讨[J]. 贵州地质, 1990, 7(1): 77—82.
- [6] 安裕伦, 蔡广鹏, 熊书益. 贵州高原水土流失及其影响因素研究[J]. 水土保持通报, 1999, 19(3): 47—52.
- [7] 杨传明. 广西岩溶石漠化变化规律及强弱程度遥感分析[J]. 国土资源遥感, 2003, (2): 34—36, 63.
- [8] 杨胜天, 朱启疆. 人机交互式解译在大尺度土壤侵蚀遥感调查中的作用[J]. 水土保持学报, 2000(3): 88—92.

- [ 9 ] 周忠发, 黄路迦, 肖丹. 贵州高原喀斯特石漠化遥感调查研究——以贵州省清镇市为例[ J ]. 贵州地质, 2001, 18( 2 ): 93—98.
- [ 10 ] 周中发. 遥感和 GIS 技术在贵州喀斯特地区土地石漠化研究中的应用[ J ]. 水土保持通报, 2001, 21( 3 ): 52—54, 66.
- [ 11 ] 杨胜天, 朱启疆. 贵州典型喀斯特环境退化与自然恢复速率[ J ]. 地理学报, 2000, 55( 4 ): 459—466.
- [ 12 ] 杨胜天. 基于非结构性知识发现的土壤侵蚀信息提取方法及其应用研究[ D ]. 北京: 北京师范大学, 2001.
- [ 13 ] 兰安军, 张百平, 熊康宁, 等. 黔西南脆弱喀斯特生态环境空间格局分析[ J ]. 地理研究, 2003, 22( 6 ): 733—742.
- [ 14 ] 胡宝清, 黄秋燕, 廖赤眉, 等. 基于 GIS 与 RS 的喀斯特石漠化与土壤类型的空间相关性分析——以广西都瑶族自治县为例[ J ]. 水土保持通报, 2004, 24( 5 ): 67—70.
- [ 15 ] 杨胜天, 朱启疆, 李智广. 智能化土壤侵蚀遥感解译系统[ J ]. 水土保持学报, 2002, 16( 1 ): 54—57.
- [ 16 ] 彭顺风, 钱名开, 徐时进, 等. 史灌河流域水量平衡研究[ J ]. 气候与环境研究, 2001, 6( 2 ): 234—239.
- [ 17 ] Whitehead D, Kelliher F M. Modeling the water balance of a small pinus radiata catchment[ J ]. Tree Physiology, 1991, ( 9 ): 17—33.
- [ 18 ] Tajchman S J, Fu H, Kochenderfer J N. Water and energy balance of a forested Appalachian watershed[ J ]. Agricultural and Forest Meteorology, 1997, 84: 61—68.
- [ 19 ] 孟广涛, 郎南军, 方向京, 等. 滇中华山松人工林的水文特征及水量平衡[ J ]. 林业科学研究, 2001, 14( 1 ): 78—84.
- [ 20 ] 杨海军, 孙立达, 余新晓. 晋西黄土区森林流域水量平衡研究[ J ]. 水土保持通报, 1994, 14( 20 ): 26—31.
- [ 21 ] 王兵, 刘世荣, 崔向慧, 等. 全球陆地生态系统水热平衡规律研究进展[ J ]. 世界林业研究, 2002( 1 ): 19—28.
- [ 22 ] 龚元石, 李保国. 农田水量平衡模型对作物根系吸水函数及蒸散公式的敏感性[ J ]. 水土保持研究, 1996, 3( 3 ): 1—7.
- [ 23 ] 韩德儒, 杨文斌. 人工柠条固沙林长期水量平衡分析[ J ]. 干旱区资源与环境, 1995, 9( 1 ): 78—85.
- [ 24 ] 刘树华, 辛国君. 沙坡头人工植被区和流动沙丘上热量平衡观测研究[ J ]. 气象, 1994, 20( 1 ): 9—12.
- [ 25 ] Stromberg J C, Wilkins S D, Tress J A. Vegetation-hydrology models: Implications for management of prairie riparian ecosystems[ J ]. Ecosystems Applications, 1993, 3( 2 ): 307—314.
- [ 26 ] Poiani K A, Johnson W C. A spatial simulation model of hydrology and vegetation dynamics in semi-permanent prairie wetlands[ J ]. Ecosystems Applications, 1993, 3( 2 ): 279—293.
- [ 27 ] 刘昌明, 孙睿. 水循环的生态学方面: 土壤—植被—大气系统水分能量平衡研究进展[ J ]. 水科学进展, 1999, 10( 3 ): 251—259.
- [ 28 ] 孙睿, 刘昌明. 地表水热通量研究进展[ J ]. 应用生态学报, 2003, 14( 3 ): 434—438.
- [ 29 ] 李玉灵, 王林和, 张国盛. 毛乌素沙地樟子松人工林热量平衡的研究[ J ]. 内蒙古林学院学报, 1998, 20( 4 ): 31—35.
- [ 30 ] 李胜功, 赵哈林, 何宗颖, 等. 灌溉与无灌溉大豆田的热量平衡[ J ]. 兰州大学学报( 自然科学版 ), 1997, 33( 1 ): 98—104.
- [ 31 ] 杨晓光, 沈彦俊, 张录达. 麦田水热传输的控制效应及非线性特征分析[ J ]. 北京农业大学学报, 2000, 5( 1 ): 101—104.
- [ 32 ] Aboitiz M, Labadie J W, Heermann D F. Stochastic soil moisture estimation and forecasting for irrigated fields[ J ]. Water Resources Research, 1986, 22( 2 ): 180—190.
- [ 33 ] 徐祝龄. 农田蒸发与蒸发力的测定和计算方法[ J ]. 北京农业大学学报, 1990, 16( 2 ): 235—239.
- [ 34 ] 李新, 周宏飞. 干旱区农田蒸散量的日间变化分析[ J ]. 干旱区资源与环境, 2000, 14( 3 ): 82—87.
- [ 35 ] 龚元石, 李保国. 蒸散量变化的随机模型[ J ]. 中国农业大学学报, 1996, 1( 1 ): 101—107.
- [ 36 ] 刘树华, 辛国君. 沙坡头人工植被区和流动沙丘上热量平衡观测研究[ J ]. 气象, 1994, 20( 1 ): 9—12.
- [ 37 ] 杨胜天, 田雷. 喀斯特地区土壤水分层均衡模型应用研究[ J ]. 中国岩溶, 2005, 24( 3 ): 186—191.