

基于遥感信息预测土壤水分研究

何 玲^{1,2}, 汪志农¹, 莫兴国²

(1. 西北农林科技大学, 杨陵 712100; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘 要: 土壤水分是水文学、气象学、土壤学、生态学以及农业科学等研究领域中的一个重要的参数。总结了当前国内外基于遥感信息监测土壤水分的原理和方法, 特别是对数据同化法进行了着重阐述。通过对各类方法的比较, 认为数据同化法是监测土壤水分最有前景的方法之一。

关键词: 土壤水分; 遥感信息; 数据同化法

中图分类号: S152.7; TP79

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2006)02-0168-04

Study on Forecasting Soil Moisture Based on Remote Sensing Information

HE Ling^{1,2}, WANG Zhi-nong¹, MO Xing-guo²

(1. Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Soil moisture is an important factor in research fields of hydrology, meteorology, pedology, ecology, agricultural science and so on. But it is a difficult one to gain. The principle and methods of monitoring the soil moisture based on remote sensing information are reviewed. Especially much attention was paid on the data assimilation method. By comparing these methods, the data assimilation method will have a promising prospect for monitoring the soil moisture.

Key words: soil moisture; remote sensing information; data assimilation method

土壤水分是水文学、气象学、土壤学、生态学以及农业科学等研究领域中的一个重要的参数, 也是一个比较难得到的参数。传统的土壤水分监测方法采样速度慢、样点稀疏且耗费大量的人力、物力和财力, 最主要的缺陷是难以同时在大面积范围内进行监测, 且存在着时间上的滞后性, 不能达到实时监测的目的。随着科学技术日新月异, 尤其是卫星遥感技术地蓬勃发展, 诸多学者已着手遥感信息预测土壤水分。通过遥感地表信息, 借助水热传输模型和水文模型等及时地再现土壤水分的空间分布, 据此来监测旱情, 指导农业灌溉与排水, 合理开发、管理水资源, 提高水资源的利用效率。纵观国内外研究进展, 基于遥感信息预测土壤水分的方法有: 热惯量法, 作物缺水指数法, 微波遥感法, 植被指数法, 数据同化法等。

1 预测土壤水分方法与研究进展

1.1 热惯量法

土壤热惯量是土壤的一种热特性, 控制着土壤温度日较差的大小, 而土壤温度日较差又与土壤水分密切相关, 实际上, 温度日较差扮演了“桥梁”作用, 将土壤热惯量和土壤水分联系起来。日益丰富的卫星遥感影像资料提供了大量的温度日较差信息, 因此, 我们就可利用卫星数据建立热惯量和表层土壤水分之间的关系。研究表明: 热惯量与土壤水分之间存在线性关系或指数关系或幂函数关系。

早期研究热惯量模型的有 Price^[1]和 Pratt^[2], 二人地表能量平衡方程基础上, 简化地表能量平衡方程中的潜热项和

显热项, 提出了热惯量模型, 但该模型需要大量手工实测数据来驱动。于是, Price^[3]于 1985 引入热容量制图 (HCM) 产品 - “表观热惯量” (P_{ATI} , 如下式) 以替代热惯量。

$$P_{ATI} = \frac{25VC(1-\alpha)}{T_{13:30} - T_{2:30}} \quad (1)$$

式中: S —— 太阳常数 (W/m^2); V —— 大气透射率; C —— 关于太阳赤纬和经、纬度的函数; α —— 反射率; $T_{13:30}$ —— 13:30 时地表温度 (K); $T_{2:30}$ —— 2:30 时地表温度 (K)。

“表观热惯量”基本可通过遥感信息获得, 但其仅适合于土壤含水量较低的干旱地区。余涛^[4]在 Price, Pratt 等人研究基础上提出一种改进的模型, 通过简化地表热量平衡中各项为地表温差的函数, 导出了热惯量与地表综合参数 (B) 和地表温差之间的关系式, 使得该模型推广到植被覆盖稀少和湿润地区, 缺点是模型涉及到的参数多, 较复杂。田国良等^[5]则提出一个非常简单的热惯量模型, 模型如式 (2):

$$P_{ATI} = \frac{1-A}{T_d - T_n} \quad (2)$$

式中: T_d —— 白天地表温度 (K); T_n —— 夜间地表温度 (K); A —— 全波段反照率。

1.2 作物缺水指数法

当植被生长茂盛时, 由于植被覆盖, 用可见光-近红外波段遥感信息无法直接获取土壤水分。为此, 可通过植被因缺水表现的植被冠层温度和周围气温的差别 (冠气温差) 来反映植被根层水分亏缺情况。

作物缺水指数定义为:

收稿日期: 2005-05-19

基金项目: 国家科技部 863 计划 (2003AA 20904002) 资助

作者简介: 何玲 (1979-), 女, 硕士, 研究方向, 生态环境模拟与遥感应用; 通讯作者: 莫兴国。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

$$CWSI = 1 - \frac{ET}{ET_0} \quad (3)$$

式中: ET ——植被实际蒸散量(mm/d), 是关于太阳净辐射、阻抗和冠气温差等函数; ET_0 ——植被潜在蒸散量(mm/d), 可由彭曼公式求出。

从定义式中看出: $CWSI$ 越大, 反映土壤供水能力越差, 即土壤越干旱, 反之亦然。目前, 可通过 NOAA/AVHRR 和 MODIS 等获取植被冠层的热红外温度以及地表反照率, 从而可以计算出实际蒸散。

目前主要有 3 种作物缺水指数模型: $Idso$ [6] 经验模型; Jackson [7] 理论模型; Alves 等 [8] 改进的作物缺水指数模型。

$Idso$ 探讨了潜在蒸发状态下的冠气温差 ($T_c - T_a$) 和无蒸腾作用发生时的冠气温差与饱和水汽差 (VPD) 之间的关系, 发现冠气温差和空气饱和差之间成线性关系, 提出作物缺水指数经验模型。Jackson [7] 在植被覆盖密闭情况下, 根据冠层单层能量平衡阻力模型导出冠气温差上、下限方程, 提出作物缺水指数理论模型。Alves 在潜在蒸发条件下, 用“地表湿球温度”大大简化 Jackson 理论模型, 提出一种改进的作物缺水指数模型。三种模型都表明: $CWSI$ 与冠层温度 (T_c)、空气温度 (T_a) 以及空气水汽压差 (VPD) 这三个变量相关。

申广荣 [9] 借助 GIS 技术, 将遥感图像、地形图和地面气象站实测数据融合到一起计算 $CWSI$ 。

谢贤群 [10] 和陈镜明 [11] 等认为风速对空气动力学阻抗抗较大, 从而影响了蒸散量。为此, 二人分别采用不同方法对空气动力学阻抗进行修正。赵昕奕 [12] 考虑到作物在不同的生育期对水分需求不同, 通过引入作物系数 (K_c) 来修正实际蒸发蒸腾量。

1.3 微波遥感法

微波遥感监测土壤水分的机理是干土和水的介电常数明显不同 (水的介电常数约为 80, 干土的是 3~5), 土壤水分的多少直接决定着介电常数的大小。不同介电常数的物体对雷达发出的微波信号产生的回波不同, 据此可以建立土壤水分和土壤回波后向散射系数之间的关系。微波遥感法分主动微波遥感法和被动微波遥感法。主动微波遥感法是主动微波遥感器发射一束经调制的电磁波能量, 并且接收后向散射回波, 通过后向散射系数 σ° , 建立起土壤水分与后向散射回波的关系。被动微波遥感法通过微波辐射计获得土壤亮度温度, 然后依据物理模型反演土壤水分。主动微波法多用 X 波段侧视雷达为主, 而被动微波遥感则多采用微波辐射计。

美国在“农业与资源航天遥感调查计划”中, 系统地研究了土壤表面粗糙度和土壤介电常数对微波遥感土壤水分的影响。研究表明, 被动微波遥感反演土壤水分受到植被覆盖 [13]、地表温度 [14] 以及地表粗糙度 [15] 等因素影响。然而, Jackson [16] 认为在大尺度范围内, 地表粗糙度对土壤水分的反演影响较小, 可以忽略不计, 主要影响因素则是地表温度和植被覆盖。

李杏朝 [17] 通过对实测土壤水分与雷达监测土壤水分比较, 发现雷达监测土壤水分基本合乎实测情况。杨虎等 [18] 基于 IEM 模型, 找到一组最优传感器参数, 在该组参数下, 地表后向散射系数与土壤粗糙度无关, 而仅为土壤水分的函数。

1.4 植被指数法

植被指数法从植被的角度来监测土壤水分。我们知道, 植被的长势与土壤水分密切相关, 当光照、温度等条件变化不大时, 若水分充足, 植被生长良好, 反之则生长较差。因此, 水分是否亏缺直接影响到作物生物量、叶面积指数以及覆盖度的大小。植被指数依据叶绿素在红光波段吸收大部分光

谱, 而在红外波段强烈反射光谱特性来表达植被状态信息。常见模型有: 归一化植被指数模型 ($NDVI$)、距平植被指数模型 (AVI) 及条件植被指数模型 (VCI) 等。

$$NDVI = \frac{\rho_{\text{air}} - \rho_{\text{red}}}{\rho_{\text{air}} + \rho_{\text{red}}} \quad (4)$$

$$VCI = \frac{100(NDVI - NDVI_{\min})}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad (5)$$

$$AVI = NDVI - NDVI \quad (6)$$

式中: ρ_{air} ——近红外光谱反射率; ρ_{red} ——红光波段光谱反射率; $NDVI_{\max}$, $NDVI_{\min}$ ——某一时段内最大和最小的植被指数; $NDVI$ ——某一时段内平均植被指数。

Kogan [19] 在不同生态环境下用 VCI 模型监测干旱, 并依据 VCI 的取值范围对干旱进行分级。Liu [20] 等比较 VCI 法和 $NDVI$ 法, 发现前者更能准确地监测干旱的范围及其边界。陈维英 [21] 用 AVI 模型验证了河南省 1992 年特大旱情, 发现山区适合用 AVI 模型。

1.5 数据同化法

数据同化就是为了达到某一最佳目标, 将不同空间、不同时间、采用不同手段获得的观测资料按一定的规则有机结合起来, 建立相互协调的分析或预报优化系统, 以确定那些不能直接观测的量, 以及未观测到的地方的相关信息, 同时模型本身也得到了优化 [22]。数据同化的目的是最小化目标泛函, 即最小化 (7) 式表达的函数, 从而得到某一地表特征参数的最优估计。

$$J(x_0, \alpha) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (H_i \{ [M(x_0, \alpha)]_i \} - y_i^0) R_i^{-1}$$

$$(H_i \{ [M(x_0, \alpha)]_i \} - y_i^0) + \frac{1}{2} (x_0 - x_0^b) B^{-1} (x_0 + x_0^b) \quad (7)$$

式中: J ——目标函数; i ——是离散后的数值模型积分步长; x_0 ——状态矢量的初始条件; α ——被同化变量组成的列矩阵; 上标 0: 同化周期开始状态; x_0^b ——背景场; y_i^0 ——时刻的观测值; M ——模型算子; H_i ——被观测算子; R_i ——观测误差矩阵; B ——背景场误差矩阵。

数据同化最早用于数值天气预报和海洋预测系统中, 直到 20 世纪 90 年代末才被用来研究陆地地表过程。自 1995 年以来, 北美、欧洲和中国分别相继建立陆面数据同化系统, 北美陆面数据同化系统 (NLDA S) 旨在研究美洲大陆陆面状态和地表通量, 欧洲陆面同化系统则主要研究土壤水分及其改进水文预报, 中国西部陆面数据同化系统围绕西北干旱地区和青藏高原土壤水分、地表温度等参数进行研究, 为大尺度水文循环提供可信的数据。

数据同化法预测土壤水分是比较一个新的研究, 通过耦合遥感数据、常规量测数据、水文模型和土壤水热传输模型等来实现。纵观国内外进展知, 大致同化两类数据预测土壤水分: 一类为同化表层土壤水分以预测整个根系层土壤水分; 另一类为同化气象数据 (如地表温度、地表温度变化趋势等) 预测土壤水分。

Hurk [23] 比较了从卫星遥感图上获得的蒸腾系数和数值天气预报模型模拟的蒸腾系数, 分析蒸腾系数和土壤水分之间的关系, 并用二者偏差来调节土壤水分变化量, 尽量使模型模拟的土壤水分接近真值。Li [24] 基于陆地地表模型, 用顺序同化法来模拟土壤水分, 通过对比分析模型模拟的结果与同化地表土壤水分和降雨资料等得到的结果, 得出后者比前者更能准确地反映土壤水分的时空分布。Montaldo [25] 将同化模型模拟的土壤水分和观测的表层土壤水分用于 SVAT 模型中, 来预测根系层土壤水分。由于模型限制, 该同化处理

只适合植被根系层是非饱和情况,且同化时间尺度为 1 d。2001 年, Montaldo^[26]用类似的方法,根据获取模型模拟的、观测的根部土壤水分以及土壤特性的时间尺度不同,强调从多个时间尺度同化表层土壤水分以预测根系层土壤水分,发现多时间尺度同化明显提高预测根系层土壤水分的能力,并使其预测范围扩展到饱和情况。Healthman^[27]等用直接插入法同化实测的和模型模拟的表层土壤水分以预测深层土壤水分,试验结果表明直接插入法能够较为准确地预测 30 cm 以内的土壤水分。

Ottle^[28]等及 McIner^[29]分别同化地表温度来预测土壤水分。前者只进行了几个散点的研究,后者仅在很短的时间段内进行预测。Lakshmi^[30]在该二人的基础上展开对美国西南平原地区面上和时间段上的研究。Lakshmi 认为地表温度是影响土壤水分的主要因子,简单地线性组合观测的地表温度和模拟的地表温度,将组合后的地表温度代入模型来修正模型模拟的土壤水分。这种简单的地表温度同化可以更准确地预测土壤水分。

2 分析方法比较

热惯量法已形成了一套比较完善的研究方案,其预测精度较高,且容易实现,适合裸露或植被覆盖稀少的地区。我们知道,风速对地表潜热和显热的作用不容忽视,从而影响着土壤水分地再分布,而现有的热惯量模型都没有考虑这一因子。

对于部分或完全植被覆盖的地区,尽可能地采用作物缺水指数法。从一定程度上说,该方法弥补了热惯量法的不足。当某一地区只有单时相遥感资料时,可以考虑用作物缺水指数法和植被指数法。但前者需要大量的气象站实测数据来支

参考文献

- [1] Price J C. The inertia mapping: A new view of the earth[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1977, 82(18): 2 582- 2 590
- [2] Prater D A, Foster S J, et al A Calibration procedure for fourier series thermal inertia models[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1980, 46(4): 529- 538
- [3] Price J C. On the Analysis of Thermal Infrared Imagery The Limited Utility of Apparent Thermal Inertia[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1985, 18: 59- 73
- [4] 余涛, 田国良. 热惯量法在监测土壤表层水分变化中的研究[J]. *遥感学报*, 1997, 1(1): 24- 31
- [5] 田国良, 杨希华, 郑柯. 麦旱情遥感监测模型研究[J]. *环境遥感*, 1992, 7(2): 83- 89
- [6] Idso S B. Non water-stress baselines: A key to measuring and interpreting plant water stress[J]. *Agriculture Meteorology*, 1982, 27: 59- 70
- [7] Jackson R D, Idso S B, Reginao R J. Canopy temperature as a crop water stress indicator[J]. *Water Resource Research*, 1981, 17(4): 1 133- 1 138
- [8] Alves I Non water-stressed baselines for irrigation scheduling with infrared thermometers: A new approach[J]. *Irrigation Science*, 2000, 19(2): 101- 106
- [9] 申广荣, 田国良. 基于 GIS 的黄淮海平原旱灾遥感监测研究- 作物缺水指数模型的实现[J]. *生态学报*, 2000, 20(2): 224- 22
- [10] 谢贤群. 一个改进的计算麦田总蒸发量的能量平衡- 空气动力学阻抗模式[J]. *气象学报*, 1988, 46(1): 102- 106
- [11] 陈明镜. 现代遥感蒸散模式中的一个重要缺点及改进[J]. *科学通报*, 1988, 6: 454- 457
- [12] 赵昕奕, 刘继韩. 黄淮海平原冬小麦生长期旱情分析[J]. *地理科学*, 1994, 19: 181- 185
- [13] Wigneron J P, Calvet J C, Kerr Y H, et al Microwave emission of vegetation: sensitivity to leaf characteristics[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1993, 31(3): 716- 726
- [14] Van de Griend A A. The effective thermodynamic temperature of the emitting surface at 6.6 GHz and consequences for soil moisture monitoring from space[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(8): 1 673- 1 679
- [15] Wigneron J P, Laguerre L, Kerr Y. Simple modeling of the L-band microwave emission from rough agricultural soils[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(8): 1 697- 1 707
- [16] Jackson T J, Le Vine D M, Hsu A Y, et al Soil moisture mapping at a regional scales using microwave radiometry: the

持而后者则要求有多年的植被指数累积资料。

微波遥感法排除了常规遥感信息受云、雾、时间等非人为因素干扰,可比较自由的全天候的预测表层土壤水分,通过选择合适的雷达传感器参数或由多频率、多极化和多入射角数据建立数学模型来减小地表粗糙度影响,提高土壤水分预测精度,但其运行成本较高、费用较大,从而限制了广泛地推广与应用。

所有的模型、实测资料和遥感资料都存在不同程度的误差,且各种资料还存在时空尺度不一致的问题,如何克服这些问题即为数据同化法目的所在。同化法同前述方法相比,优点如下: 能融合不同分辨率的多源数据(常规观测数据和遥感数据)于土壤水分预测模型中,大大提高模型的预测准确度; 可集成直接观测(如直接量测的土壤水分、土壤温度等)和间接观测(如利用遥感信息反演的地表参数)以充分利用有效数据; 减小陆面模型、初始边界、遥感数据和地表观测数据等带来的误差对土壤水分预测的影响。

3 研究展望

随着对地观测资料的日益丰富,遥感技术使大面积、动态预测土壤水分成为可能,并且也相继产生出多种研究方法,为了更好地预测土壤水分,可从如下几个方面进行探索与改进。首先,吸取各种研究方法的优点,将多种方法糅合在一起,共同预测土壤水分;其次,尽可能地利用多时相遥感资料来表达地表特征信息;最后,更多地借用其它研究领域的研究方法来完成土壤水分的预测,如:用气象预报和海洋预报中的数据同化法来研究土壤水分预测,这样可以大大减小遥感信息预测土壤水分时遇到的仪器误差、量测误差、模型误差等,提高土水分预测的精度和准确度。

- Southern Great Plains Hydrology Experiment[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37: 213-2150
- [17] 李杏朝. 微波遥感监测土壤水分的研究初探[J]. 遥感技术与应用, 1995, 10: 1-8
- [18] 杨虎, 郭华东, 李新武, 等. 主动微波遥感土壤水分观测中的最优雷达参数选择[J]. 高技术通讯, 2003, 9: 21-24
- [19] Kogan F N. Application of vegetation index and brightness temperature for detection[J]. Advances in Spaces Research, 1995, 15(11): 91-100
- [20] Liu W, Kogan F N. Monitoring regional drought using the vegetation condition Index[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17: 276-2782
- [21] 陈维英, 肖乾广, 盛永伟. 距平植被指数在1992年特大干旱监测中的应用[J]. 环境遥感, 1994, 9(2): 106-112
- [22] 韩桂军, 李冬, 马继瑞, 等. 数据同化在海洋数值产品制作及预报中的应用研究[J]. 海洋学报, 1999, 18(5): 54-62
- [23] Hurk V B J, Bastiaanssen W G M, Meijgaardet EV, et al. A new methodology for assimilation of initial soil moisture fields in weather prediction models using Meteosat and NOAA data[J]. Application Meteorology, 1997, 36: 1271-1283
- [24] Li J, Islam S. On the estimation of soil moisture profile and surfaces fluxes partitioning from sequential assimilation of surface layer soil moisture[J]. Journal of Hydrology, 1999, 220: 86-103
- [25] Montaldo N, Albertson J D. Robust simulation of root zone soil moisture with assimilation of surface soil moisture data[J]. Water Resource Research, 2001, 31(12): 2879-2900
- [26] Montaldo N, Albertson J D. Multi-scale assimilation of surface soil moisture data for robust root zone moisture predictions[J]. Advance in Water Resources, 2003, 26: 33-44
- [27] Heathman G C, Starks P J, et al. Assimilation of surface soil moisture to estimate profile soil water content[J]. Journal of Hydrology, 2003, 279: 1-17
- [28] Otte C, Vija- Madjar D. Assimilation of soil moisture inferred from infrared remote sensing in a hydrological model over the HAPEX-MOBILHY region[J]. Journal of Hydrology, 1994, 158: 241-264
- [29] Mcnider R T, Song A. J, Casey D M, et al. Towards a dynamic-thermodynamic assimilation of satellite surface temperature in numerical atmospheric models[J]. Month Weather Review, 1994, 122: 2784-2803
- [30] Lakshmi V. A simple surface temperature assimilation scheme for use in land surface model[J]. Water Resource Research, 2000, 36(12): 3687-3700

(上接第139页)

- [2] 王昕. 泥石流沟危险度的模糊评判[J]. 重庆师范学院学报, 2002, 19(1): 23-25
- [3] 刘家龙, 吕希奎, 刘贵应. 模糊综合评判法在泥石流灾度评价中的应用[J]. 地质科技情报, 2001, 20: 87-88
- [4] 朱静. 泥石流沟判别与危险度评价研究[J]. 干旱区地理, 1995, 18(3): 64-67
- [5] 刘汉超等. 泥石流防治工程设计规范[M]. 北京: 地质出版社, 2002
- [6] 张春山, 张业成, 马寅生. 黄河上游地区崩塌、滑坡、泥石流地质灾害区域危险性评价[J]. 地质力学学报, 2003, 9(2): 151-152

(上接第141页)

蚀力 R 值为 $603.1\text{ J}\cdot\text{cm}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, 以及厦门市6个行政区的年降雨侵蚀力建议值。

(3) 厦门市年降雨侵蚀力变化幅度大, 最小值仅为最大值的12.2%; 在空间分布上, 呈现从南部平原台地向西北部山地逐渐增大的特点。

用式(4)计算多年平均降雨侵蚀力, 较之式(2)更适合厦

门地区, 在无更详细降雨量资料的情况下, 可将其作为一种较好的估算方法使用。同时, 通过连续10年的降雨资料进行统计分析, 给出了 R 值变化范围, 直观展示了降雨侵蚀力的空间分布, 为水土流失的调查、规划及有效防治提供参考和依据。因此, 相关部门应加大年降雨侵蚀力高值区的防治力度, 采取行之有效的治理措施, 特别是控制大规模的人为破坏。

参考文献:

- [1] Wischmeier W H. A rainfall erosion index for a universal soil loss equation[J]. Soil Sci Soc Am Proc, 1959, 23(3): 246-249
- [2] 周伏健, 等. 福建省降雨侵蚀力指标 R 值[J]. 水土保持学报, 1995, 9(1): 13-18

(上接第149页)

- [13] 王晓燕, 田均良, 杨明义. 土壤剖面中 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的分布特征及其在土壤侵蚀示踪中的应用[J]. 土壤通报, 2003, 34(6): 581-585
- [14] 杨明义, 田均良, 刘普灵, 等. 用 ^{137}Cs 法研究农耕地坡面土壤侵蚀空间分布特征初报[J]. 水土保持研究, 1997, 4(2): 96-99
- [15] Walling, D. E., & He, Q. Use of fallout ^{137}Cs in investigations of overbank sediment deposition on river floodplains[J]. Catena, 1997, 29: 263-282
- [16] 李勇, 白玲玉, 张兴昌. 强度耕作对 ^{137}Cs 、 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 和有机质剖面分布的影响[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 1-4
- [17] 唐翔宇, 杨浩, 曹慧, 等. ^{137}Cs 法估算南方红壤地区土壤侵蚀作用的初步研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(3): 4-11