

毛细阻滞型腾发封顶系统中水分运移特性分析

杨清雷^{1,2}, 张金利^{1,2}, 杨庆^{1,2}, 杨钢^{1,2}

(1. 大连理工大学 岩土工程研究所, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 基于非饱和渗流理论, 在考虑降雨与腾发条件下, 建立了填埋场腾发(ET) 封顶层非饱和渗流非稳态一维控制方程。采用大连市 1976 年的气象资料作为降雨(48 a 汛期降雨最大年份)与腾发条件, 以数值方法计算所建立的一维控制方程。通过变动参数计算并分析了植被、降雨强度、降雨持续时间等对 ET 封顶层水力学特性的影响。计算结果表明, 所提出的浅层毛细阻滞型 ET 封顶层, 在强降雨期间, 可有效储存入渗雨水而不进入填埋场内部, 在无雨期间, 可有效释放土层中孔隙水。相对于无植被情况, 有植被覆盖的 ET 封顶层对雨水入渗—腾发循环的作用效果更加明显。降雨强度和降雨持续时间对封顶层含水率变化有显著影响。随着降雨强度或降雨持续时间增大, 土层含水率变化逐渐增强, 封顶层由上至下逐渐达到饱和, 说明该 ET 封顶层不适用于强降雨地区。

关键词: 腾发; 毛细阻隔; 非饱和渗流; 含水率

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)03-0007-05

中图分类号: TV131.2

Simulation of Moisture Transport in Evapo-transpiration Covers of Shallow Capillary Barrier for Landfills

YANG Qing-lei^{1,2}, ZHANG Jin-li^{1,2}, YANG Qing^{1,2}, YANG Gang^{1,2}

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

2. State Key Laboratory of Coastal and Off shore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: A one-dimensional unsteady state governing equation was developed to simulate moisture transport on the basis of unsaturated seepage flow in capillary landfill covers in response to precipitation and evapo-transpiration(ET). The numerical method was used to solve the governing equation with precipitation and ET data of Dalian in 1976(which has the most amount of precipitation in flood season in 48 years). Parametric analysis was conducted to simulate variations in plants, precipitation rate and event duration. The results show that the proposed ET cover of shallow capillary barrier effectively stored rainfall during strong rainfalls and released pore water of soil between rainfalls. Compared with the condition of no plants, ET cover stored and releases water more effectively with plants. Precipitation rate and event duration had significant influences on water content variations of the covers. The variation ranges of water contents became greater as precipitation rate and event duration increased, and the covers become saturated gradually from up to down, which shows that ET covers of this kind are not suitable for areas with strong rainfall.

Keywords: evapo-transpiration; capillary barrier; unsaturated seepage flow; water content

垃圾填埋场填埋结束后, 按规范要进行最终封顶, 以减小降雨(雪)入渗, 降低渗滤液产量。一般情况下, 填埋场封顶层多采用压实黏土层^[1]。研究表明, 对于蒸发量较大的干旱与半干旱地区, 黏土防渗层因失水可产生干裂缝, 防渗性能显著降低^[2], 渗滤液增多从而增加了填埋场运行成本。近几年, 美国一

些垃圾填埋场正在尝试用一种新的 ET(蒸发蒸腾)封顶系统代替传统的压实黏土封顶系统, 并取得了初步的研究成果^[3]。ET 封顶层是在降雨期间, 将入渗雨水储存于土层而不进入填埋场中, 在无雨期间, 将储存于土层中的水通过地表蒸发与植被的蒸腾作用, 释放到大气中, 降低土层含水率, 达到储水与释水往

收稿日期: 2010-11-08

修回日期: 2010-12-02

资助项目: 国家自然科学基金项目“膨胀岩土的体积膨胀特性及其数值模拟”(50979015)

作者简介: 杨清雷(1981—), 男(汉族), 辽宁省海城市人, 博士研究生, 主要从事水土保持与环境岩土工程研究。E-mail: qingleiyang@yahoo.com.cn。

复循环^[4,5]。ET 封顶对土料要求较低,一般就地取土,与传统封顶相比,其建造成本大大降低。ET 封顶层分为单一土层型与毛细阻隔型。粗细土层间非饱和渗透系数的差异使两土层间存在较大的毛细作用,细粒土层可储存较多孔隙水,有利于控制降雨入渗^[6]。依据阻隔层深度的不同,毛细阻隔型封顶分为深层与浅层 2 种。

目前国内外规范中对于这种新型封顶尚无规定,与其相关的科学问题尚待深入研究。王康等^[7]通过试验及水动态模型的模拟分析,得出植物层是关键组成部分的结论。Dwyer^[8]对压实黏土封顶系统和新型封顶系统的运行情况进行了现场模型试验研究;陆海军等^[9]通过对 2 种封顶系统的对比分析,得出 ET 封顶系统明显优于传统屏障型封顶系统的结论。张文杰等^[10]得到毛细阻滞型 ET 封顶系统性能优于单一土层型 ET 封顶的结论。Yang 等^[11]对深层毛细阻滞型 ET 封顶进行了数值分析。目前对浅层毛细阻滞型 ET 封顶的研究较少。

ET 封顶目前主要用于少雨地区,能否将其应用到我国东北地区,尚需要进一步研究。本文在大连市气象资料基础上,建立浅层毛细阻滞型 ET 封顶的非饱和渗流模型,探讨降雨与腾发条件下,浅层毛细阻滞型 ET 封顶层水力学特性及其影响因素,并对其性能和应用于该地区的可行性进行评价。

1 材料与方 法

1.1 ET 封顶孔隙水运移的控制方程

针对粉质黏土与砂土所构成的 ET 封顶层(如图 1 所示),假设 3 层土为均质、各向同性,并考虑植被根系所产生的优势流效应^[12],在 0.5 m 深度内,假设土层渗透系数增大($K_s' = 5K_s$)。依据质量守恒与 Darcy 定律,可得到非饱和土渗流控制方程,即 Richard 方程,可表示为^[13]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} \right] - \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \quad (1)$$

式中: θ ——体积含水率; h ——基质吸力水头; K ——渗透系数; t ——时间; z ——坐标,正方向向下。下同。

渗透系数采用 Van Genuchten 模型^[14],即:

$$K = K_s S_e^{1/2} \left[1 - (1 - S_e^{1/\gamma})^\beta \right]^2 \quad (2)$$

式中: $S_e = (1 + |dh/dz|^\beta)^{-\gamma} = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$, S_e ——有效饱和度; θ ——残余含水率; θ_s ——饱和含水率; K_s ——饱和渗透系数; K ——非饱和渗透系数; α , β , γ ——土水特性参数,且 β , γ 满足 $\gamma = 1 - 1/\beta$ 。式(1)即为非饱和土层中,孔隙水渗流控制方程。为求解上述方程,需要依据特定问题,给出相应的定解条件。

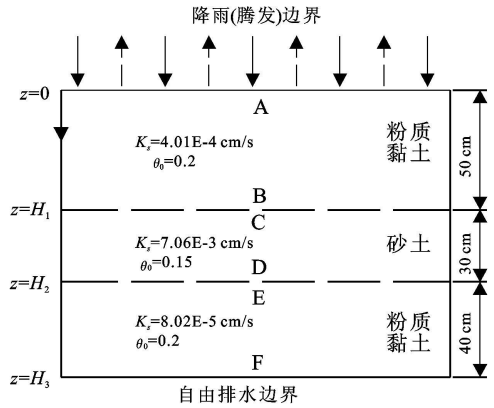


图 1 ET 封顶层及 A, B, C, D, E, F 观测点边界条件示意图

1.2 定解条件

假设在计算初始时刻,各土层含水率为常数,可表示为:

$$\begin{aligned} \theta(z, t) &= \theta_1 \quad (0 \leq z < H_1, t = 0) \\ \theta(z, t) &= \theta_2 \quad (H_1 \leq z < H_2, t = 0) \\ \theta(z, t) &= \theta_3 \quad (H_2 \leq z < H_3, t = 0) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: θ_1 ——粉质黏土层的初始体积含水率; θ_2 ——砂土层的初始体积含水率; H_1 ——上部粉质黏土层厚度; H_2 ——上部粉质黏土层与砂土层的厚度之和; H_3 ——整个封顶层的厚度。

在 $z = 0$ 处,ET 封顶层顶部为入渗边界或者腾发边界,即为流量边界,可表示为^[15]:

$$\left(-K_1 \frac{\partial h}{\partial z} + K_1 \right) \Big|_{z=0} = q(t) - e(t) \quad (t \geq 0) \quad (4)$$

式中: K_1 ——上部粉质黏土层的渗透系数; $q(t)$ ——降雨强度; $e(t)$ ——腾发强度。

在 $z = H_3$ 处,假设为自由排水边界,可表示为:

$$\frac{\partial h}{\partial z} \Big|_{z=H_3} = 1 \quad (t \geq 0) \quad (5)$$

在 $z = H_1, z = H_2$ 处,两层土的接触面保证水流连续的条件:

$$\begin{aligned} \left(-K_1 \frac{\partial h}{\partial z} + K_1 \right) \Big|_{z=H_i} &= \left(-K_2 \frac{\partial h}{\partial z} + K_2 \right) \Big|_{z=H_i} \\ (i = 1, 2; t \geq 0) \end{aligned} \quad (6)$$

式中: K_1 ——粉质黏土层的渗透系数; K_2 ——砂土层的渗透系数。

1.3 计算参数选取

选取如图 1 所示的一维土柱进行计算,设立了 A, B, C, D, E, F 共 6 个观测点。细粒土层(粉质黏土)的厚度与初始体积含水率分别为 0.9 m 与 0.20,在深度为 0.5 m 处的粗粒土层(砂土)的厚度与初始体积含水率分别为 0.3 m 与 0.15。上部边界条件采用 1976 年大连市降雨与腾发资料(该年为 48 a 来汛期降雨强度最大的年份),其全年的日降雨量分布如图 2 所示^[16]。依据该气象资料,月平均腾发量见表 1。

植被选取当地灌木, 根系深度 0.5 m, 植被覆盖度为 1, 叶面最大持水深度为 0.2 mm, 叶面积指数为 2.5, 其它相关计算参数见表 2。

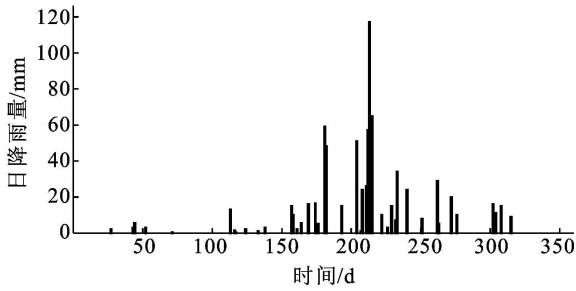


图 2 1976 年大连日降雨量直方图

表 1 月平均蒸发蒸腾强度 mm/d

月份	月均蒸发蒸腾强度	月份	月均蒸发蒸腾强度
1	2.4	7	7.5
2	2.0	8	8.7
3	2.3	9	8.5
4	2.7	10	6.8
5	4.0	11	4.6
6	4.8	12	2.6

表 2 土的工程特性与计算参数

项目	砂土	粉质黏土
FC	15%	30%
WP	5%	10%
$K_s / (cm \cdot s^{-1})$	$7.06E-3$	$8.02E-5$
$\alpha / (1 \cdot cm^{-1})$	0.022	0.026
β	1.29	1.26
γ	0.225	0.206
θ_r	0	0
θ_s	0.303	0.363

注: FC 为田间持水量; WP 为萎蔫含水率; K_s 为饱和渗透系数; α, β, γ 为土水特性参数; θ_r 为残余含水率; θ_s 为饱和含水率。

采用有限差分法对所建立的 ET 封顶层非饱和渗流控制方程进行求解。

2 结果与分析

2.1 ET 封顶层含水率随时间变化特性分析

本算例采用大连市 1976 年的降雨与蒸发资料模拟 ET 封顶层在特定气象条件下的水力学特性, 计算结果如图 3a, 4a 所示。

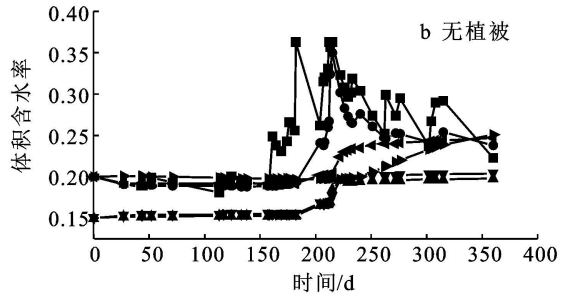
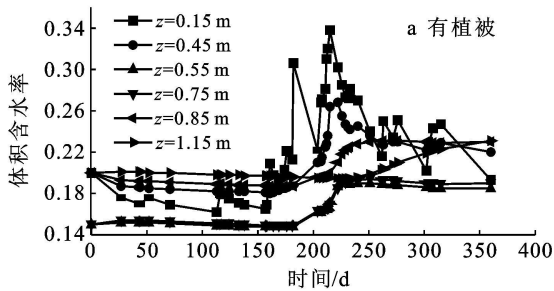


图 3 ET 封顶层不同深度的含水率随时间变化关系

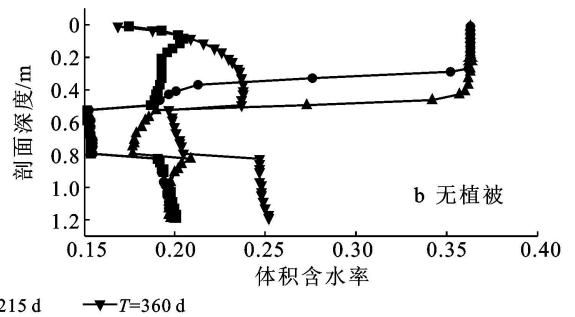
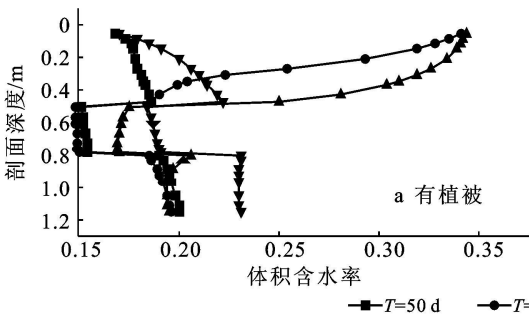


图 4 ET 封顶层不同时刻含水率变化剖面图

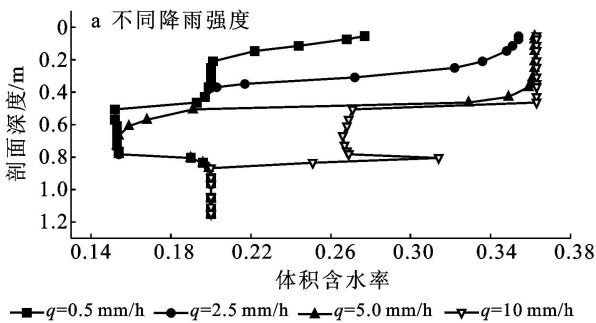
由大连市 1976 年气象资料可知, 在 1~ 180 d 范围内降雨较少, ET 封顶层主要以蒸发与蒸腾方式将土层中的水释放到大气中, 土层含水率降低, 特别是表层含水率降低幅度较大。在 150~ 220 d 降雨较多, 由图 3a 可见, 受降雨入渗影响, 土层含水率显著

增大且随深度变化梯度较大, 顶部土层含水率达到饱和, 底部土层含水率亦相应提高, 入渗雨水储存于土层中。中间的砂土层含水率较低, 且沿深度变化不大。处于底部的粉质黏土层含水率变动幅度较小, 最终含水率只增加 3%, 表明 1.2 m 厚的 ET 封顶层可

有效阻止降雨进入填埋场。在 230 d 以后, 降雨较少, 蒸发与蒸腾量较大, ET 封顶层逐渐将土层中储存的水释放到大气中, 土层含水率相应下降, ET 封顶层起到了储水与释水作用。图 4a 给出不同时刻下, ET 封顶层含水率分布剖面图, 由图可见, 有降雨时, 上部土层含水率较大, 随深度逐渐降低, 无降雨时, 上部土层含水率较小。T = 360 d 中间砂土层与底部粉质黏土层含水率有明显增加, 但没有高于持水能力 FC。其余 3 个时刻, 中间砂土层与底部粉质黏土层含水率变化较小。

2.2 植被蒸腾作用影响分析

ET 封顶层作为填埋场最终封顶层使用时, 一般应进行绿化, 考虑到土层含水率受植被蒸发与蒸腾影响, 在此分别针对有植被覆盖与无植被覆盖 2 种情况, 进行对比分析, 图 3b, 4b 给出无植被覆盖下的计算结果。由图 3—4 可见, 植被对 ET 封顶层土层含水率在时空分布上具有一定影响。在无降雨期间, 有植被覆盖下, 上部土层释水能力较无植被覆盖强, 土层含水率较低。在强降雨期间, T = 215 d, 无论有无植被情况下, 上部土层含水率均超过 FC。无植被覆盖下, 上部土层达到饱和状态, 底部土层含水率明显增大, 而有植被覆盖时, 在同样降雨强度下, 上部土层底部尚未达到饱和状态, 表明植被对强降雨入渗具有明显的阻挡作用。



2.3 降雨强度的影响分析

针对降雨强度分别为 0.5, 2.5, 5 和 10 mm/h, 降雨持续时间为 24 h 的工况进行计算, 计算结果如图 5a 所示。

由图 5a 可以分析得出, 不同降雨强度条件下土层断面含水率变化规律有所不同。降雨强度越大, 土层含水率的变化越强烈。上部与中部土层依次达到饱和。

经过 24 h 降雨后, 降雨强度为 2.5 mm/h 时, 上部土层未达到饱和, 含水率沿深度逐渐减小, 中部砂土层含水率基本无变化; 降雨强度为 5 mm/h 时, 上部土层基本达到饱和, 中部砂土层含水率明显增大; 降雨强度为 10 mm/h 时, 上部粉质黏土层与中部砂土层均达到饱和。深度 0.9 m 以下土层含水率基本无变化。

针对降雨强度为 5 mm/h, 降雨持续时间分别为 4, 8, 18, 24, 36, 72 h 等工况进行计算, 计算结果如图 5b 所示。由图 5b 可见, 含水率沿深度逐渐减小。降雨持续时间为 8 h 后, 上部土层逐渐达到饱和。24 h 后, 上部土层完全饱和, 中部砂土层含水率逐渐增大, 直至饱和。18 h 前, 中部砂土层与底部粉质黏土层含水率基本无变化。作用 72 h 后 0.9 m 以下土层含水率基本无变化。

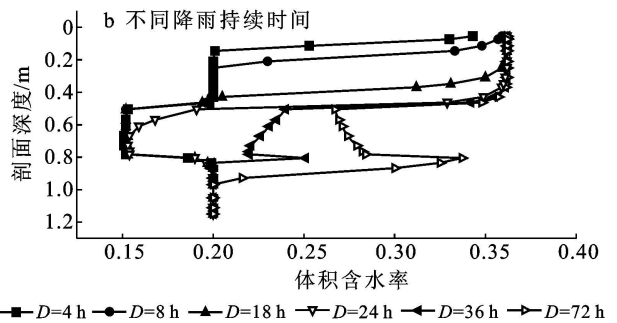


图 5 降雨强度与降雨持续时间对土层剖面含水率的影响

3 结论

针对由粉质黏土层与砂土层所构成的浅阻隔型 ET 封顶层结构体系, 基于非饱和渗流理论, 建立了一维非稳态渗流控制方程, 并以大连市 1976 年的气象资料作为降雨与腾发边界条件, 采用数值计算方法, 通过变动参数计算与分析, 探讨了 ET 封顶层孔隙水运移特性, 可得到以下结论:

(1) 所提出 ET 封顶层(三层结构: 0.5 m 粉质黏土层、0.4 m 砂土层、0.3 m 粉质黏土层), 在降雨期

间, 可有效储存降雨入渗水量而不进入填埋场, 无雨期间可有效释放土层孔隙水进入大气, 具有良好的储水与释水功能。

(2) 相对于无植被情况, 有植被覆盖的 ET 封顶层对雨水入渗—腾发循环的作用效果更加明显。

(3) 降雨强度和降雨持续时间对封顶层含水率变化有显著影响。随着降雨强度或降雨持续时间增大, 土层含水率变化逐渐增强, 封顶层由上至下逐渐达到饱和, 说明 ET 封顶层不适用于强降雨地区。

[参 考 文 献]

- [1] 中华人民共和国建设部. CJJ17-2004 城市生活垃圾卫生填埋技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [2] Kelly L M, Danielle N G, Richard J W. Evapo-transpiration covers: An innovative approach to remediate and close contaminated sites[J]. Remediation Winter, 2003, 14(1): 55-67.
- [3] Schnabel W, Lee W, Barnes D L. A numerical simulation of evapotranspiration cover performance at three cold-region locations[C] // World water and environmental resources congress Anchorage, Alaska, USA, 2005.
- [4] Wayllace A, Likos W J. Numerical modeling of artificial soil as an evapotranspirative cover[C] // Proceedings of the fourth international conference on unsaturated soils, Carefree, Arizona, USA. 2006: 646-657.
- [5] Weand H V, Gill M. Natural covers for landfill and buried waste[J]. Journal of Environmental Engineering, 2001, 127: 768-775.
- [6] Forman A D, Anderson J E. Design and performance of four evapotranspiration caps [J]. Pract. Periodical of Haz., Toxic, and Radioactive Waste Mgmt., ASCE, 2005, 9(4): 263-272.
- [7] 王康, 周祖昊, 王富庆. 蒸发覆盖垃圾填埋场渗漏水控制试验及活性区域模型模拟[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2008, 41(2): 32-36.
- [8] Dwyer S F. Water balance measurements and computer simulations of landfill covers [D]. Albuquerque: The University of New Mexico Albuquerque, New Mexico, 2003.
- [9] 陆海军, 栾茂田, 张金利. 垃圾填埋场传统封顶和 ET 封顶的比较研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 509-514.
- [10] 张文杰, 邱战洪, 朱成仁, 等. 长三角地区填埋场 ET 封顶系统的性能评价[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(3): 384-389.
- [11] Yang Q L, Yang Q, Zhang J L, Luan M ao T. Numerical analysis of moisture transport in evapo-transpiration landfill cover with capillary barrier[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 14(K): <http://www.ejge.com/2009/JourTOC14K.htm>.
- [12] Knisel W, Crems A. A field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems[R]. Department of Agriculture, Conservation Research Report, 1980: 640-641.
- [13] Warrick A W. Soil water dynamics[M]. New York: Oxford University Press, 2003.
- [14] El-Kadi A I. Validity of the generalized Richard's equation for the analysis of pumping test Data for a coarse-material aquifer [J]. Vadose Zone Journal, 2005, 4: 196-205.
- [15] Lehmann F, Ackerer P H. Comparison of iterative method for improved solutions of the fluid flow equation in partially saturated porous media[J]. Transport in Porous Media, 1998, 31(3): 275-292.
- [16] 王玲玲, 邹耀仁, 隋洪起. 对大连历年汛期起止日期的客观判定[J]. 气象, 2000, 26(3): 12-15.

(上接第6页)

- [11] 夏冬冬, 施能, 陈绿文. 1948—2000 年 ENSO 事件与全球陆地年降水量的关系[J]. 南京气象学院学报, 2003, 26(3): 333-340.
- [12] 臧增亮, 包军, 赵建宇, 等. ENSO 对东亚夏季风和我国夏季降水的影响研究进展[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2005, 6(4): 394-398.
- [13] 龚道溢, 王绍武. ENSO 对中国四季降水的影响[J]. 自然灾害学报, 1998, 7(4): 44-52.
- [14] 丁一汇. 中国的气候变化与气候影响研究[M]. 北京: 海洋出版社, 1997: 27-38.
- [15] Chao J P, Chao Q C, Liu L. The ENSO events in the tropical pacifle and dipole events in the Indian Ocean[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2006, 20(2): 223-321.
- [16] Wang S W, Zhu J H, Cai J N, et al. Reconstruction and analysis of time series of ENSO for the last 500 years[J]. Progress in Natural Science, 2004, 14(12): 1074-1079.
- [17] 孙建华, 赵思雄. 1998 年夏季长江流域梅雨期环流演变的特殊性探讨[J]. 气候与环境研究, 2003, 8(3): 294-306.
- [18] 刘芸芸, 丁一汇. 西北太平洋夏季风对中国长江流域夏季降水的影响[J]. 大气科学, 2009, 33(6): 1225-1237.
- [19] 何丽, 吴宜进, 但长军. 近百年全球气温变化对长江流域旱涝灾害的影响[J]. 中国农业气象, 2007, 28(4): 364-366.
- [20] 曾小凡, 翟建青, 苏布达, 等. 长江流域年平均气温的时空变化特征[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(5): 274-31.