

塔克拉玛干沙漠公路防护林棵间土壤蒸发及蒸发量估算

张建国^{1,2,3}, 孙树国^{2,3}, 徐新文², 雷加强², 李生字²

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 棵间土壤蒸发是塔克拉玛干沙漠公路防护林耗水的重要组成部分。应用 Micro-Lysimeters 测定了 1 个灌溉周期内咸水滴灌下距林木不同位置处的土壤蒸发量。分析了土壤蒸发与水面蒸发的关系, 通过一维平差处理对防护林土壤蒸发量进行了估算。结果表明, 塔里木沙漠公路防护林棵间土壤蒸发具有明显的季节变化特征。试验初期棵间土壤蒸发量: 根基部 > 距根基 50 cm 处 > 距根基 100 cm 处; 第 5 d 以后, 根基 50 cm 处 > 根基部 > 距根基 100 cm 处。林地土壤蒸发随土壤含水量的减低呈整体下降趋势。通过估算, 咸水滴灌下整个防护林年土壤蒸发总量为 $2.63 \times 10^6 \text{ m}^3$, 占总灌水量的 21.43%, 生长季蒸发量占全年蒸发量的 92.28%。

关键词: 防护林; 咸水滴灌; 土壤蒸发; 蒸发量估算; 塔克拉玛干沙漠

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2011)01-0145-04

中图分类号: S152.7+3

Characterizing and Estimating Soil Evaporation in Taklimakan Desert Highway Shelterbelt

ZHANG Jian-guo^{1,2,3}, SUN Shu-guo^{2,3}, XU Xin-wen², LEI Jia-qiang², LI Sheng-yu²

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi, Xinjiang 830011, China; 3. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Soil evaporation is an important component of water consumption of the Taklimakan Desert Highway Shelterbelt. Micro-Lysimeters were used to measure soil evaporation within an irrigation cycle at different distances from the trees drip-irrigated with saline water. Meanwhile, the relationship between soil evaporation and water surface evaporation was analyzed, and soil moisture evaporation was estimated through one-dimensional adjustment processing. The results show that a spatial-temporal variation pattern of soil evaporation can be clearly identified in the shelterbelt; at the starting stage, the order of soil evaporation was tree base > 50 cm from tree base > 100 cm from tree base; and after the 5th day, the order was 50 cm from tree base > tree base > 100 cm from tree base. Soil evaporation in the shelterbelt decreased with soil water contents. The estimation shows that annual total soil evaporation of the shelterbelt will be approximately $2.63 \times 10^6 \text{ m}^3$ with drip-irrigation using saline water, accounting for 21.43% of total irrigation volume, and soil evaporation in a growing season accounts for 92.28% of annual soil evaporation. As soil evaporation results in such a high amount of water loss, appropriate measures may be required for reducing soil evaporation and improving water use efficiency.

Keywords: shelterbelt; drip-irrigation with saline water; soil evaporation; evaporation estimation; the Taklimakan Desert

淡水资源缺乏是威胁人类生存的最主要问题之一, 咸水灌溉是解决该问题的有效途径之一, 有关这方面的研究成为当前研究的热点^[1-5]。塔克拉玛干沙漠公路防护林生态工程全长 436 km, 全部穿越流动沙漠

地段, 造林树种以抗逆性极强的优良防风固沙灌木为主, 采用公路沿线 4~28 g/L 的高矿化度地下水进行滴灌。塔克拉玛干沙漠公路防护林生态工程建设保障了沙漠公路的畅通, 促进了南疆地区社会经济的发展。

收稿日期: 2010-04-11

修回日期: 2010-07-30

资助项目: 国家自然科学基金项目“塔克拉玛干沙漠咸水滴灌林地土壤盐结皮形成发育过程研究”(40901137); 新疆维吾尔自治区重大科技专项(200733144-3); 西北农林科技大学博士科研启动项目(22050205); 西北农林科技大学基本科研业务项目

作者简介: 张建国(1981—), 男(汉族), 山东省菏泽市人, 博士, 讲师, 主要从事土壤水盐运移及荒漠化防治研究。E-mail: jianguo21@tom.com。

通信作者: 徐新文(1963—), 男(汉族), 山东省菏泽市人, 博士生导师, 研究员, 主要从事荒漠化防治方面的研究。E-mail: sms@ms.xjb.ac.cn。

土壤蒸发是自然界水循环中重要的一环,受多重因素的制约和影响,在生态系统水量平衡和能量平衡中占有重要地位。研究表明, Micro-Lysimeters (MLS)既可用于测定裸土土面蒸发,又可用于测定作物冠层下的土壤蒸发,是一种测量土壤蒸发实用且比较精确的有效工具^[6-7]。但是,应用该方法测定棵间土壤蒸发耗时耗力,因而寻求一种省时省力的测定或推导方法来替代现有测定方法是十分必要的。水面蒸发的测定相对方便快捷,通过探讨棵间土壤蒸发与水面蒸发的关系,利用水面蒸发量推求土壤蒸发量可以大大减少实验工作量。很多学者对土壤蒸发和水面蒸发进行了大量的研究,但对于二者之间关系的探讨还未见相关报道^[8-9]。本文应用 MLS 对塔里木沙漠公路防护林棵间土壤蒸发进行了测定,并同步设置了水面蒸发实验,综合分析两者之间的关系,对林带土壤棵间蒸发量进行了估算。研究沙漠公路防护林棵间土壤蒸发,对于估算整个防护林的耗水规律和制定合理的灌溉制度,探讨测定棵间土壤蒸发的新方法,节约有限的地下水资源,提高水分利用效率,均具有重要意义。

1 研究区概况

研究区位于塔克拉玛干沙漠腹地(即常说的塔中地区)的沙漠公路防护林带内。该防护林于 1998 年人工种植,长 7 km,宽 20 m,平均高度 1.0~1.2 m,主要包括怪柳(*Tamarix chinensis*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)和沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)等抗逆性极强的灌木、半灌木,配置方式为行间混交,株行距 1 m×2 m,平均郁闭度 0.5 左右。研究区地理坐标 39°01' N, 83°36' E,海拔 1 100 m 左右。该区年平均气温 12.4 °C,一年中最热月为 7 月份,月平均气温 28.2 °C;最冷月为 12 月份,月平均气温 -8.1 °C。≥10 °C 的活动积温 4 618.6 °C;年平均降水量 24.6 mm;年平均相对湿度 29.4%,≤30% 的低湿日数 246.6 d,蒸发量为 3 638.6 mm;平均风速 2.5 m/s,最大瞬时风速 20.0 m/s,年起沙风日数 130 d 以上,风沙危害严重。地面景观以流动性高大复合沙垄为主,土壤类型绝大部分为流动风沙土。丘间平坦沙地的地下水埋深一般在 3~5 m,水质较差,矿化度一般在 4.0~4.8 g/L 之间,主要为 Cl⁻, SO₄²⁻, Na⁺, Mg²⁺, 含 F⁻ 量 2.6 mg/L^[10]。

研究区防护林灌溉方式为滴灌,灌溉水矿化度为 4.04 g/L。于 3—5 月份和 9—10 月份 15 d 灌水 1 次,6—8 月份 10 d 灌水 1 次,每次灌水量为 30 L/m²,11 月至翌年 2 月免灌。

2 材料与方法

棵间土壤蒸发用 MLS 于 2008 年 8—9 月份直接测定。MLS 用 0.3 cm 厚的 PVC 管制成,高 20 cm,内径 10 cm,同时设有内径为 11 cm,材料相同的有底外筒固定于土壤中。

为了保证取样与实际土壤状况相一致,将 MLS 内筒(上下都开口)垂直压入取样,直到上口与地面平齐,然后将其从土壤中挖出将下口封死埋设于采样处,取样位置分别位于林木基部、距根基部 50, 100 cm 处,重复数为 3。用精度为 0.01 g 的天平称量,MLS 土体每日 9:00 称重后更换。应用下列公式计算日棵间土壤蒸发量:

$$E=10\times(E_0-E_c)/\pi(0.5d)^2 \quad (1)$$

式中: E ——棵间土壤蒸发量(mm); E_0 ——MLS 初始重量(g); E_c ——MLS 第 2 d 重量(g); d ——MLS 内筒直径(cm)。

同时,应用 20 cm 蒸发皿测定防护林带内和裸地咸水水面蒸发,连续观测 1 a,以用于棵间土壤蒸发与水面蒸发关系分析和防护林棵间土壤蒸发总量的估算。

3 结果与分析

对塔克拉玛干沙漠公路防护林体系采用滴灌方式灌溉,属于点源灌溉^[10]。灌溉过程中水分由滴头向下层和周围的土壤渗透,是一个三维的入渗过程,属于非均匀灌水,滴头只对一定的区域产生影响,形成明显的湿润区、湿润峰和湿润区外围,3 个区域的土壤含水量存在较大差异。同时,由于林木树冠下不同位置处的遮荫效果不同,从而造成不同位置处土壤水分蒸发的差异。

3.1 距离树木不同位置处的棵间蒸发

图 1 是一个典型灌溉周期内土壤水分蒸发量的变化图。由图 1 可知在试验初期(第 1—4 d)棵间蒸发量大小顺序为:根基部>距根基 50 cm 处>距根基 100 cm 处;在试验第 5 d 以后,其顺序为:根基 50 cm 处>根基部>距根基 100 cm 处。这是由于灌溉水分从树木根基部即滴头位置缓慢向周围侧渗,灌溉初期根基部土壤含水量最高,而其它位置的含水量相对较低;但是随着树木根基部土壤水分的侧渗蒸发等作用,其土壤含水量逐渐降低,蒸发量也随之降低,而距离根基 50 cm 处由于土壤水分的补给,土壤蒸发量变化比较缓慢,距离根基 100 cm 处位于灌溉形成的水平湿润峰外围,土壤水分含量最小,因此蒸发量也最小。

土壤水分蒸发累积变化曲线图(图 2)可以明显地表示出以上 3 点之间的差异,第 1—5 d 灌溉初期的累积蒸发曲线斜率:根基部>距根基 50 cm>距根基 100 cm,与日变化规律相同,且在 1 个灌溉周期内累积蒸发量一直是根基部最大,据根基 50 cm 次之,据根基 100 cm 最小。

在 1 个灌溉周期之内,根基部、距根基 50 cm 处以及距根基 100 cm 处土壤的水分累积蒸发量分别为

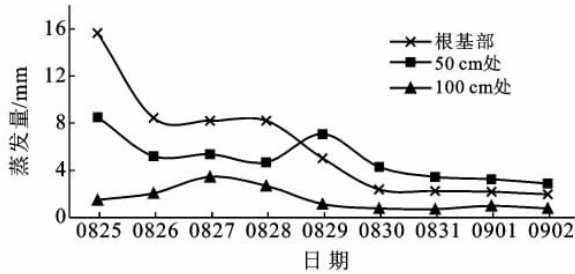


图 1 一个灌溉周期内防护林棵间土壤蒸发日变化

54.42, 44.83, 14.16 mm,三者之间的比例为 1 : 0.824 : 0.260。分析结果表明,土壤水分累积蒸发曲线与灌溉后的天数呈明显的对数变化,根基部、距根基 50 cm 处和距根基 100 cm 处回归方程分别表示为: $y=18.699\ln x+13.757, R^2=0.987 2$; $y=17.431\ln x+0.069 16, R^2=0.987 2$; $y=17.431\ln x+0.069 16, R^2=0.946 2$; $y=6.097 5\ln x+0.691 5, R^2=0.980 1$ 。

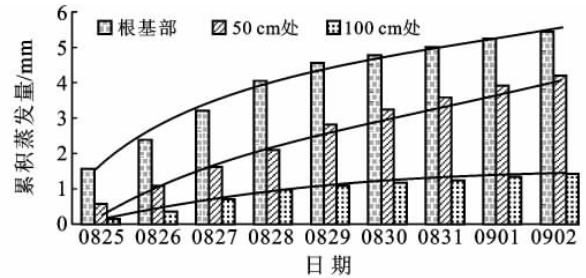


图 2 一个灌溉周期内防护林棵间土壤水分累积蒸发量

3.2 棵间土壤蒸发与水面蒸发的关系

水面蒸发实验包括用直径为 20 cm 蒸发器 E_{20} 测得的裸地、林地内的水面蒸发,将每天水面蒸发量深度单位(mm)转化为质量单位(g/m^2)。

由图 3 可知,随着气象要素的变化,林地 E_{20} 蒸发、裸地 E_{20} 蒸发同步变化,其数值大小为:裸地 E_{20} > 林地 E_{20} > 林地土壤蒸发。林地土壤水分蒸发量一定程度上表现出随气象要素的波动变化,但受土壤含水量的影响,整体呈下降趋势。

根据典型灌溉周期内林地土壤蒸发与水面蒸发的关系,得到如表 1 所示的灌溉周期内林地土壤蒸发与林带、裸地 E_{20} 蒸发器测水面蒸发的对比关系。在试验第 1 d,土壤蒸发水分供应充足,土壤水分蒸发量最大,当日土壤水分蒸发量是林带 E_{20} 测值的 21.84%,是裸地 E_{20} 测值的 9.25%,林带 E_{20} 测值、裸地 E_{20} 测值分别是林地土壤蒸发的 4.58 和 10.81 倍。同时发现,林带 E_{20} 测值为裸地的 42%~54%,平均为 51.53%,试验期间林带水面累积蒸发量为裸地的 51.37%。由此可知,裸地水面蒸发量远大于林地,前者约为后者的 1.95 倍,而林带棵间土壤蒸发量又远小于林带水面蒸发量。

表 1 灌溉周期内林地水分蒸发与不同下垫面的仪器所测水面蒸发量之间的关系

蒸发量比值	比例变化范围/%	平均比例/%	累积比例/%	累积比例倒数(换算倍数)
林地 E_s /林地 E_{20}	5~22	11.67	11.05	9.05
林地 E_s /裸地 E_{20}	2~10	5.84	5.67	17.60

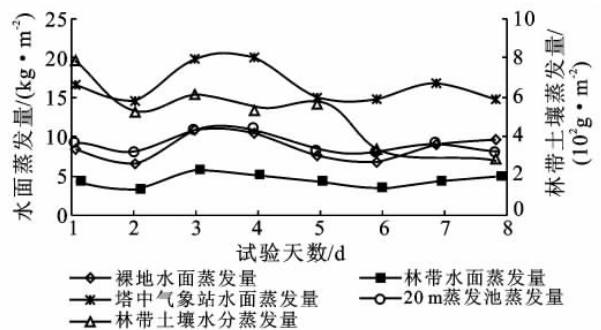


图 3 林地土壤水分蒸发和水面蒸发量日变化

3.3 林带土壤水分蒸发量的估算

要准确估算单株树木周围的土壤水分蒸发量比较复杂,而试验仅观测了棵间 3 个典型位置的土壤蒸发,因此,为了简化计算,特作以下假设。

假设在根基部与距根基 50 cm 之间以及距根基 50 cm 与距根基 100 cm 之间,每日的土壤水分蒸发量随空间位置而均匀过渡,即插值与空间距离呈线性关系。MLS 内径为 10 cm,因此空间插值的密度也选择 10 cm,根基、距根基 50 cm、距根基 100 cm 的实际测值分别代表 0~10, 45~55, 90~100 cm 区域蒸发量,将三者之间各划分 4 个插值区,分别为 5~15, 15~25, 25~35, 35~45 cm 和 55~65, 65~75, 75~85, 85~95 cm。插值计算公式为:

$$I_i = E_L - (E_L - E_S) i / 5 \quad (2)$$

式中: I_i ——两测点间的第 i 个插值区的插值; E_L ——两测点中的大值; E_S ——两测点中的小值; i ——两测点间的 i 插值区顺序($i=4$,从 E_L 到 E_S)。

最后将原始测值和内差值按照其位置依次定义为 D_I (I 为各位置的序号,从根基部向外排列, $I=11$)。

计算结果表明,从 2008 年 8 月 25 日至 9 月 2 日,防护林一个灌溉周期内土壤湿润区土壤累积蒸发为 13.128 kg,折合 4.179 kg/m²。

通过实验发现,在 2008 年 8—9 月的气象条件下,在一个灌溉周期内,林地土壤水分累积蒸发量与同期旷野裸地 E_{20m} 累积测值的比例为 5.40%,日平均比例也为 5.40%(表 1)。在生长季节中,该比例可能随着月份而变化,在此为简化计算,假设都为这一比例。根据塔中气象站多年平均 E_{20} 月累积测值,通过表 1 各月份旷野裸地 E_{20} 与 E_{20m} 测值的折算系数和林地土壤水分蒸发量与旷野裸地 E_{20m} 测值的平均比例,计算了研究区植物生长季节内各月份的林地土壤水分蒸发量(图 4)。

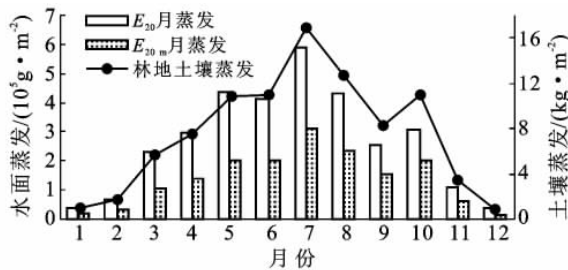


图 4 研究区水面蒸发与林地土壤水分蒸发的季节变化

由图 4 可见,林带全年土壤水分蒸发量为 90.96 kg/m²,林带内全年土壤水分蒸发呈现季节性变化,1—7 月土壤水分蒸发量逐渐增大,7—12 月土壤水分蒸发量逐渐减小,其中 12 月的林带土壤水分蒸发量最小,为 0.82 kg/m²;7 月的林带土壤水分蒸发量最大,为 16.92 kg/m²。林带土壤水分蒸发的季节变化规律明显:春(2—4 月)、夏(5—7 月)、秋(8—10 月)、冬(11—1 月)各个季节内林带的土壤水分蒸发量分别为 15.03, 38.72, 32.02, 5.19 kg/m²,其中夏季和秋季最大。在植物的生长季节内(3—10 月),林带土壤水分蒸发量为 84.00 kg/m²,占全年土壤水分蒸发量的 92.35%,按照现行的灌溉周期(3—5 月和 9—10 月 15 d,6—8 月 10 d,共灌溉 19 次)和灌溉定额(滴头流量 90 ml/min,灌溉时间 12 h)来计算,生长季节内共灌水 391.90 kg/m²,因此约有 21.43%的灌溉水以土壤蒸发的形式损失掉。

按照塔里木沙漠公路防护林林带总面积 3 128 hm²,地下咸水密度以 1 g/cm³ 计算,林带全年土壤水分蒸发量为 2.85×10⁶ m³,春夏秋冬各个季节内林带的土壤水分蒸发量分别为 4.70×10⁵, 1.21×10⁶, 1.00×10⁶, 1.70×10⁵ m³,占全年土壤水分蒸发量的

比例分别为 16.52%, 42.57%, 35.24%, 5.71%,夏季最大,秋季和春季次之,冬季最小(图 5);整个生长季节内林地土壤水分累积蒸发量为 2.63×10⁶ m³,占全年土壤水分蒸发量的 92.28%。

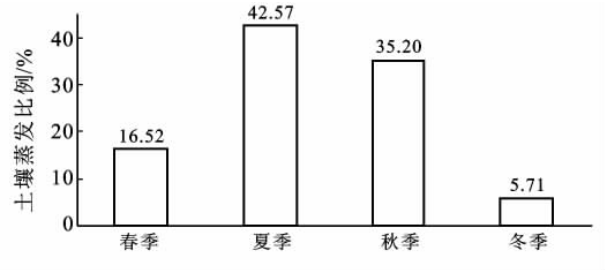


图 5 不同季节林带土壤水分蒸发比例

4 结论

(1) 试验初期裸间土壤蒸发量大小顺序为:根基部>距根基 50 cm 处>距根基 100 cm 处;试验第 5 d 后,其顺序为:根基 50 cm 处>根基部>距根基 100 cm 处,这主要是由灌溉水分的时空变化差异造成的。

(2) 林地 E_{20} 蒸发、林间裸地 E_{20} 蒸发、旷野 E_{20} 蒸发与旷野 E_{20m} 蒸发同步变化,其数值大小为:旷野 E_{20} >旷野 E_{20m} >林间裸地 E_{20} >林地 E_{20} >林地土壤蒸发,其中林间裸地 E_{20} 和旷野 E_{20m} 最为接近。林地土壤水分蒸发量一定程度上也表现出随气象要素的波动变化,但受土壤水分含量的影响,呈整体下降趋势。

(3) 通过一维平差处理,根据裸间土壤蒸发实验与同期的林带水面蒸发的关系估算出整个林带全年土壤水分蒸发量为 2.85×10⁶ m³,占灌溉水量的 21.43%;春夏秋冬各个季节内林带的土壤水分蒸发量占全年土壤水分蒸发量的比例分别为 16.52%, 42.57%, 35.24%, 5.71%;整个生长季节内林地土壤水分累积蒸发量为 2.63×10⁶ m³,占全年土壤水分蒸发量的比例为 92.28%。

(4) 鉴于裸间土壤蒸发量所占灌水量的比例较高,也就是说无谓消耗较大,采取施用土壤蒸发抑制剂,增加土壤表层覆盖等^[11-14]适当措施降低土壤蒸发,提高林木水分利用效率是可行的。

[参 考 文 献]

- [1] Su N H, Bethune M, Mann L, et al. Simulating water and salt movement in tile-drained fields irrigated with saline water under a serial biological concentration management scenario [J]. Agricultural Water Management, 2005, 78: 165-180.

(下转第 248 页)

[参 考 文 献]

- [1] 刘军会,高吉喜,耿斌,等. 北方农牧交错带土地利用及景观格局变化特征[J]. 环境科学研究,2007,20(5):148-154.
- [2] 陈百明,刘新卫,杨红. LUCC 研究的最新进展评述[J]. 地理科学进展,2003,22(1):22-29.
- [3] 李秀彬. 全球环境变化研究的核心领域:土地利用土地覆被变化的国际研究动向[J]. 地理学报,1996,51(6):553-558.
- [4] 巨仁,张文孝,郭扶国. 黄土高原土地资源及其优化利用[M]//杨文治,余存祖. 黄土高原区域治理与评价. 北京:科学出版社,1991:16-26.
- [5] 唐克丽,王斌科. 人类加速侵蚀的演变和强度[M]//叶青超. 黄河流域环境演变与水沙运行规律研究. 济南:山东科学技术出版社,1994:78-83.
- [6] 江晓波,马泽忠,曾文蓉,等. 三峡地区土地利用/土地覆被变化及其驱动力分析[J]. 水土保持学报,2004,18(4):108-112.
- [7] 张晓萍,董冰让,李锐,等. 黄河中游河龙区间土地利用与林地覆被格局变化研究[J]. 水土保持学报,2007,21(5):163-166.
- [8] 杨胜天,刘昌明,孙睿. 近 20 年来黄河流域植被覆盖变化分析[J]. 地理学报,2002,57(6):679-684.
- [9] 梁伟,李滚,杨勤科. 黄河中游多沙粗沙区土地利用格局变化分析[J]. 中国水土保持科学,2009,7(3):52-58.
- [10] 刘国彬. 安塞县马家沟流域水土保持综合治理设计报告[R]. 陕西 杨凌:中国科学院水利部水土保持研究所,2009.
- [11] 廖克著. 现代地图学[M]. 北京:科学出版社,2003:288-293.
- [12] 朱会义,李秀彬. 关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论[J]. 地理学报,2003,58(5):643-650.
- [13] 吕昌河,程量. 土地利用变化与生态服务功能冲突[J]. 干旱区研究,2007,24(3):302-306.
- [14] 张海龙,蒋建军,解修平,等. 近 25 年来西安地区土地利用变化及驱动力研究[J]. 资源科学,2006,28(4):71-77.
- [15] 霍艳杰,卫海燕,薛亮,等. 基于指数分析法的西安市土地利用变化及驱动力研究[J]. 国土资源遥感,2009(2):49-53.
- [16] 刘志超,杨改河,杜英,等. 退耕还林(草)对黄土丘陵沟壑区农民经济生活影响的分析[J]. 水土保持研究,2008,15(1):169-175.

(上接第 148 页)

- [2] Wang Y R, Kang S Z, Li F S, et al. Saline water irrigation scheduling through a crop-water-salinity production function and a soil-water-salinity dynamic model [J]. *Pedosphere*, 2007,17(3):303-317.
- [3] Ould Ahmed B A, Yamamoto T, Rasiah V, et al. The impact of saline water irrigation management options in a dune sand on available soil water and its salinity [J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 88:63-72.
- [4] 陈效民,白冰,黄德安. 黄河三角洲海水灌溉对土壤盐碱化和导水率的影响[J]. 农业工程学报,2006,22(2):50-53.
- [5] 乔玉辉,宇振荣. 河北省曲周盐渍化地区微咸水灌溉对土壤环境效应的影响[J]. 农业工程学报,2003,19(2):75-79.
- [6] 刘钰, Fernando R M, Pereira L S. 微型蒸发器田间实测麦田与裸地土面蒸发强度的试验研究[J]. 水利学报,1999,30(6):45-49.
- [7] 孙景生,康绍忠,王景雷. 沟灌夏玉米棵间土壤蒸发规律的试验研究[J]. 农业工程学报,2005,21(11):20-24.
- [8] 胡继超,张佳宝,冯杰. 蒸散的测定和模拟计算研究进展[J]. 土壤,2004,36(5):492-497.
- [9] 武金慧,李占斌. 水面蒸发研究进展与展望[J]. 水利与建筑工程学报,2007,5(3):46-50.
- [10] 中国石油天然气总公司塔里木石油勘探开发指挥部. 塔里木沙漠石油公路[M]. 北京:石油工业出版社,1996.
- [11] 贾运岗,张富仓,李培岭. 大田滴灌条件下土壤水分运移规律的试验研究[J]. 灌溉排水学报,2007,26(6):15-18.
- [12] Fernández J E, Moreno F, Murillo J M, et al. Evaluating the effectiveness of hydrophobic polymer for conserving water and reducing weed infection in a sandy loam soil[J]. *Agricultural Water management*, 2001, 51:29-51.
- [13] 耿玉清,王保平. 森林地表枯枝落叶层涵养水源作用的研究[J]. 北京林业大学学报,2000, 22(5):49-52.
- [14] 王改玲,郝明德,李仲谨. 不同覆盖物和蒸发抑制剂对土壤蒸发影响的研究初报[J]. 水土保持研究,2003,10(1):133-136.