

# 草坪与地被 科学进展

陈佐忠 周 禾 主编

中国林业出版社

# 草坪与地被科学进展

陈佐忠 周 禾 主编

中国林业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

草坪与地被科学进展 / 陈佐忠, 周 禾 主编. - 北京: 中国林业出版社, 2006. 8  
ISBN 7-5038-4514-7

I. 草… II. ①陈…②周… III. ①草坪-研究②地被植物-研究 IV. S688.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 078350 号

《草坪与地被科学进展》  
编 委 会

主 编 陈佐忠 周 禾

编委会 (按姓氏拼音顺序排列)

陈佐忠 蔡朵珍 孙 彦 王兆龙

徐 佳 周 禾 赵炳祥

中国林业出版社·环境景观与园林园艺图书出版中心

电话: 66176967 66189512 传真: 66176967

---

出版 中国林业出版社 (100009 北京西城区刘海胡同7号)

E-mail cfphz@public. bta. net. cn 电话 66184477

网址 www. cfph. com. cn

发行 新华书店北京发行所

印刷 三河市富华印刷包装有限公司

版次 2006年8月第1版

印次 2006年8月第1次

开本 787mm×1092mm 1/16

印张 19.5

字数 500千字

定价 80.00元

---

凡本书出现缺页、倒页、脱页等质量问题, 请向出版社图书营销中心调换。

版权所有 侵权必究

## 前 言

本书酝酿于2004年在四川成都召开的中国草学会草坪专业委员会成立20周年纪念会之后。那时，我们深深感到，为了进一步提高我国草坪科技的水平，推动我国草坪科技的健康与可持续发展，我们有必要回顾我国20年草坪科技发展的历史，总结我国20年草坪科技发展的经验，展望我国未来草坪科技发展的趋势。这一想法得到草坪科技界同仁们的大力支持与赞同，因之，在我们关于征集本书论文的通知发出后，得到国内外同仁们的积极响应。本书的文章主要由三部分组成：专门为本书撰写的草坪与地被科学进展论文；在北京召开的全国地被科学研讨会论文；2005年在英国召开的国际草坪大会论文；这些论文，基本上反映了国内外草坪科技发展的现状、动态、水平与趋势，对于了解国内外草坪与地被科学的状况，推动我国草坪科技的提高与发展，会有一定作用。而在本书编写的过程中，赵炳祥博士、孙彦副教授、王兆龙博士等做了大量具体的工作。而本书的出版，得到了北京市园林局的支持。对此，我们表示衷心的感谢。

编者

2006年3月

# 目 录

## 前言

- 1 草坪耗水与合理灌溉研究进展 ..... 赵炳祥 陈佐忠 (1)
- 2 野牛草研究进展 ..... 周 禾 何 梅 王晓荣 (16)
- 3 国外草坪杂草化学防除技术的某些进展 ..... 张志国 张 勇 (28)
- 4 草坪抗旱抗热生理研究及进展——综述 ..... 黄炳茹 许 燕 (38)
- 5 台湾结缕草的种原特性及育种 ..... 翁仁宪 (45)
- 6 生物技术 in 草坪草育种中的应用进展 ..... 韩烈保 信金哪 曾会明 (51)
- 7 狗牙根 (*Cynodon* spp.) 种质资源及其遗传改良研究进展 ..... 刘建秀 马克群 (63)
- 8 草坪植物生长调节剂研究进展 ..... 张训忠 (74)
- 9 草坪草遗传育种研究进展 ..... 李 洁 王兆龙 赵炳祥 (98)
- 10 环境安全型草坪有害生物综合管理 (IPM) 研究进展 .....  
..... 殷朝珍 赵炳祥 王兆龙 (104)
- 11 高尔夫果岭根际层土壤研究进展 ..... 朱燕华 赵炳祥 王兆龙 (112)
- 12 百慕大草坪春季坏死病研究进展 ..... 王海英 王兆龙 (119)
- 13 稀土防治草坪病害的理论基础及应用前景 .....  
..... 慕康国 崔建宇 赵炳祥 胡 林 (124)
- 14 草坪杂草防控国内外研究进展 ..... 王建光 田 艳 李治国 (129)
- 15 运动场草坪研究进展 ..... 韩烈保 宋桂龙 (149)
- 16 新疆狗牙根资源的研究进展 ..... 阿不来提 孙宗玖 石定燧 李培英 赵 清 (158)
- 17 土壤含水量对草坪草出苗和早期生长的影响 ..... 杨云贵 寇建村 赵 昆 (164)
- 18 北京地区草坪建植与养护管理规范化技术体系的研究 ..... 徐 荣 马 玉 (168)
- 19 中国现代草坪高等教育实践与进展 ..... 孙吉雄 (174)
- 20 中国现代草坪高等教育 20 年 (1983 ~ 2004 年) ..... 孙吉雄 (180)
- 21 施钾对草地早熟禾生物量、枯草量和草坪质量的影响 .....  
..... 祝美俊 王显国 孙 彦 韩建国 王 培 樊奋成 鲍青成 (182)
- 22 草坪与地被植物种子质量检验的现状与发展趋势 .....  
..... 孙 彦 韩建国 毛培胜 秦歌菊 (188)

- 23 地被植物的研究进展 ..... 余 莉 任爽英 董 丽 (193)
- 24 观赏草种类、观赏价值及其用途 ..... 高 鹤 刘建秀 (201)
- 25 重视地被植物应用 加强地被植物科学研究 ..... 陈佐忠 赵炳祥 (207)
- 26 北京地区地被植物在园林绿化中的应用研究与发展趋势 .....  
..... 白淑媛 蔺 艳 梁 芳 (211)
- 27 北京地区野生草本地被植物引种、筛选与利用 ..... 马 洁 韩烈保 (223)
- 28 黑龙江省 3 种具有开发与草坪应用前景的野生地被植物 ..... 龚束芳 杨 涛 (228)
- 29 深圳类芦边坡绿化的应用状况 ..... 王 炜 孙发政 刘荣堂 (233)
- 30 北京奥运与城市野生地被植物开发应用研究 .....  
..... 《城市绿地地被植物开发应用》课题组 (238)
- 31 几种地被植物在北京园林绿化中的应用研究 .....  
..... 郝留彦 姚 远 郑维霞 王长久 (243)
- 32 公路路域环境区域划分与环境特征的调查研究 .....  
..... 江玉林 陈学平 李振宇 陈宗伟 (248)
- 33 乡土地被植物——蛇莓的应用研究与推广 ..... 胡国强 郑维霞 王长久 (253)
- 34 北京地被植物应用现状与发展前景 ..... 周肖红 (259)
- 35 新型地被植物——观赏草 ..... 袁小环 滕文军 武菊英 (266)
- 36 景天植物在轻型屋顶绿化上的应用 ..... 赵定国 薛伟成 (269)
- 37 柃木属植物在园林绿化中用作地被的探讨 ..... 史燕山 骆建霞 (274)
- 38 古城立交桥下地被、耐荫植物应用初探 ..... 陈宪章 (278)
- 39 提高养护水平以保绿化成果 ..... 白淑媛 (281)
- 40 专用作地被的匍匐型紫花苜蓿金达 ..... 房丽宁 (289)
- 41 “翠绿 1 号”假俭草建坪优势及技术 ..... 李炳杰 (291)
- 42 多功能新品种草坪——“翠绿 1 号”假俭草 ..... 李炳杰 (294)
- 43 浅析城市广场园林绿化 ..... 李秋梅 焦 伍 (298)
- 44 冷季型草坪草施肥要点 ..... 王艳春 赵燕翎 (301)
- 45 引种节水型地被植物尖叶石竹的应用 ..... 戴忠宪 (303)

# 1 草坪耗水与合理灌溉研究进展

赵炳祥<sup>1</sup> 陈佐忠<sup>2</sup>

(1. 中国农业大学资源与环境学院 2. 中国科学院植物研究所, 北京 100094)

**摘要:** 不同草坪蒸散率有很大差异。高草坪的蒸散是经由土壤—植物—大气连续体的动态水分传输过程。草坪蒸散研究是草坪节水的基础。合理灌溉是草坪节水的主要措施之一。合理灌溉就是要根据草坪的实际水分需求, 确定草坪的最适灌溉量。

草坪具有美化环境、净化空气、调节气温、固持水土、为人们提供运动休闲场地等多种功能<sup>[1]</sup>。人类对草坪的应用有非常悠久的历史<sup>[2]</sup>。在现代社会中, 经济的快速增长, 城市化进程的加快促使草坪业大规模发展, 人均草坪绿地的占有量已成为衡量城市人口生活质量和城市文明程度的重要标准。

蒸散 (evapotranspiration, ET) 是植物蒸腾和植物生长的土壤蒸发的合称。在农业生产中它是衡量作物耗水、指导灌溉的重要指标。人们很早就开始了蒸散的研究。1966年, Philip 提出土壤—植物—大气连续体 (SPAC) 的概念为蒸散研究提供了坚实的理论基础<sup>[3]</sup>。在土壤—植物—大气连续体中, 蒸散包括了土壤与大气、植物与大气之间的双重水分关系, 受来自这3个层面多种因素的影响, 错综复杂。草坪蒸散是草坪植物蒸腾和草坪土壤蒸发的合称。人们早期对草坪蒸散的研究侧重于基本规律的探讨, 并参照了作物和牧草蒸散的大量数据<sup>[2]</sup>, 直至20世纪50、60年代, 水资源危机加剧, 城市用水紧张, 可用于灌溉草坪的水源受到极大限制, 以节水为主要目的的草坪蒸散研究逐渐兴起<sup>[4,5]</sup>。

草坪与农作物、牧草虽然都是人类驯化的产物, 但人类对它们的使用目的有很大差别。作物和牧草直接或间接为人类提供衣、食等生活的基本原料, 它们的籽实产量和茎、叶、根的生长量是人们栽培种植管理他们的主要目标之一; 而人们建植管理草坪则主要是为了获得浓密均一、低矮平整的地被, 一般不希望它大量生长。这种不同的使用目的使他们的蒸散特性具有很大的区别。作物的棵间蒸发在其蒸散中占相当大的比例, 而正常生长的草坪完全覆盖地表, 草坪草的蒸腾是草坪蒸散的主体, 植株间土壤的蒸发量很小, 以致可以忽略不计<sup>[6]</sup>。另外, 作物和牧草的冠层结构在他们不同的生育时期变化很大, 导致蒸散特征因其生育时期而异<sup>[7]</sup>; 而养护管理得当的草坪, 在整个生长季中生殖生长被抑制, 没有明显的生育时期的变化, 频繁的修剪使其冠层结构一般保持稳定, 这样, 不同季节的气候变化成为影响草坪蒸散的主要因素。总之, 草坪有其独特的蒸散特性, 和牧草及农作物相比其蒸散的复杂性相对较低<sup>[4]</sup>。

以草坪蒸散率研究为基础, 草坪的蒸散研究主要包括以下相互联系的3个方面 (图1)。本文就这3个方面对草坪蒸散研究的进展予以论述。

## 1 草坪蒸散率

草坪的耗水率 (water use rate, WUR) 是指单位面积、单位时间内草坪蒸散和草坪植物

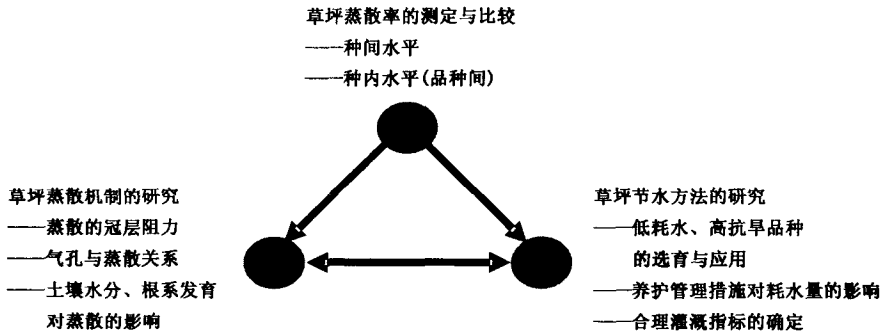


图1 草坪蒸散研究的主要内容及相互关系

Fig. 1 Three main compositions of turfgrass evapotranspiration study and their relations

生长用水量的总和<sup>[2]</sup>。一般用 mm/d 表示。草坪的蒸散率 (ET rate) 是指单位面积、单位时间内草坪的蒸散量, 它略小于草坪的耗水率。在研究和实际应用中人们测定的主要是蒸散率, 所以常用它来表示草坪耗水量<sup>[4]</sup>。

草坪蒸散率直接反映了草坪水分需求量, 是草坪水分管理的一个基本依据。影响草坪蒸散率的因素非常多。土壤、气候等环境因素的影响力很大, 不同地理环境下同一种草坪的蒸散率会相差很大。在同一地区, 不同的草种、同一草种的不同品种的草坪蒸散率也有差异。因此, 了解当地环境条件下所使用草种的草坪蒸散率是草坪合理灌溉的前提。

### 1.1 草种的草坪蒸散率

20 世纪 60 年代前, 草坪蒸散并未被专门研究。草坪蒸散率的测定往往穿插在农作物或牧草的蒸散研究中, 或出现在研究蒸散机理的文献中<sup>[2,5,7,8]</sup>。

20 世纪 60 年代后期, 美国的干旱、半干旱地区, 水供应短缺, 水价上涨, 草坪养护耗水引起了人们的强烈关注。1967 年, 美国西部的一个经济研究协会的报告指出, 草坪总养护费用中, 水消耗 (按单位面积的耗水量和水价计算) 占 14.5%, 仅次于劳力消耗而位居第二。提高草坪水分管理的水平, 充分利用日趋减少的灌溉用水, 保证草坪的质量成为草坪蒸散研究的主要方向。但直到 20 世纪 70 年代后期人们对草坪蒸散的研究仍然十分有限, 仅有少量报道。

Tovey<sup>[5]</sup>测定了 Reno, Nevada 的混播草坪 (草地早熟禾 34.0%、细羊茅 19.6%、草地羊茅 14.5%、丘氏羊茅 14.7%、白三叶 9.8%、其他草种 7.4%) 和杂交狗牙根 (Tiway 和 Tifgreen) 的草坪蒸散率。在充足供水的条件下, 壤土上混播草坪 3 个生长季 (1965、1966、1967) 的平均日蒸散量为 5.3mm, 而砂壤土上为 5.1mm。杂交狗牙根的日常平均蒸散量在两种土壤上差别不大, 为 4.6mm。

Beard<sup>[2]</sup>在他的草坪专著中对草坪蒸散的特点及影响因素进行了总结。由于草坪蒸散率测定的数据资料很少, 他对不同草种的蒸散率仅作了一般性描述, 指出草坪草的蒸散率一般为 2.5~7.6mm/d, 少数情况下可超过 11mm/d。草种和草坪品种的耗水量各不相同, 邱氏羊茅草坪耗水量远远少于草地早熟禾, 而匍匐翦股颖的耗水量介于二者之间。

20 世纪 80 年代初期, 草坪蒸散研究的力度大大增强, 许多相关的文献在这个时期发表。人们对不同草种的草坪蒸散率有了比较深入的认识。Beard<sup>[4]</sup>总结了当时草坪蒸散研究



的成果。他划分了草坪蒸散率大小等级 (表 1), 为人们对于草坪蒸散率的分析比较提供了更清晰的量化概念。当时, 13 种草坪草的蒸散率已被测定, 其中, 暖季型草坪草所占的比例较大, 而 50% 以上的冷季型草坪草的蒸散率仍处于未知状态。在已测定草坪蒸散率的草种中, 冷季型草坪草草地早熟禾的草坪蒸散率较低, 暖季型草坪草钝叶草、结缕草和狗牙根的蒸散率较高, 但暖季型草坪草很抗旱, 节水的潜力较大 (表 2)。

表 1 草坪蒸散率分级<sup>[4]</sup>

Table 1 A classification of evapotranspiration rates for

相对等级	蒸散率	
	mm/d	英寸/周
很低 <4.0	<1.0	
低	4.0~4.9	1.1~1.3
较低	5.0~5.9	1.4~1.6
中等	6.0~6.9	1.7~1.9
较高	7.0~7.9	2.0~2.2
高	8.0~8.9	2.3~2.5
很高	>9	>2.5

草坪适应特定环境条件的能力会影响草坪的生长状态进而影响草坪的蒸散率。Beard 当时所总结的蒸散率数据主要来自于适合暖季型草坪草生长的区域, 这些地区不能为冷季型草坪草的生长提供最适条件。这可能是某些冷季型草坪草草坪蒸散率低于暖季型草坪草的主要原因。更多地区、更多草种的蒸散有待于人们去研究。

20 世纪 80 年代末, 众多草坪工作者的努力使草坪蒸散研究有了成果性进展。美国德克萨斯 A&M 大学的 James Beard 主持的 USGA/GCSAA 资助的草坪水分研究项目及其他大量

的相关研究<sup>[9-16]</sup>已经基本阐明了美国广泛分布的 16 种常用草坪草的草坪蒸散率 (表 3)。

暖季型草坪草草坪和冷季型草坪草相比普遍具有较低的蒸散率。暖季型草坪草的夏季日平均最大蒸散率为 3~9mm, 而冷季型草坪草的为 3.6~12.6mm。密度大, 生长缓慢的杂交狗牙根、结缕草、野牛草和假俭草的耗水量很低, 细羊茅的耗水量中等, 而草地早熟禾、高羊茅、一年生早熟禾和匍匐剪股颖的耗水量很大。

表 2 草坪草的夏季平均蒸散率 (据 1985 年以前的报道总结)<sup>[4]</sup>

Table 2 Mean summer evapotranspiration rates of turfgrass (The summary of the reports results before 1985)<sup>[4]</sup>

草坪草种		夏季平均蒸散率 (田间条件下测定)	
		mm/d	英寸/周
高羊茅	<i>Festuca arundinacea</i> Schreb.	7.2~12.6	2.0~3.5
多年生黑麦草	<i>Lolium perenne</i> L.	6.6~11.2	1.8~3.1
钝叶草	<i>Stenotaphrum secundatum</i> (Walt.) Kuntze.	6.3~9.6	1.7~2.6
海滨雀稗	<i>Paspalum vaginatum</i> Swartz.	6.2~8.1	1.7~2.2
巴哈雀稗	<i>Paspalum notatum</i> L.	6.2	1.7
狼尾草	<i>Pennisetum clandestinum</i> Hochst. ex Chiov.	5.8~9.0	1.6~2.5
匍匐剪股颖	<i>Agrostis stolonifera</i> L.	5.0~9.7	1.3~2.7
野牛草	<i>Buchloë dactyloides</i> (Nutt.) Engelm.	5.7	1.6
假俭草	<i>Erenochloa ophiuroides</i> (Munro) Hack.	5.5~8.5	1.5~2.3
格兰马草	<i>Bouteloua gracilis</i> (H. B. K.) Lag. ex Steud.	5.3~7.3	1.5~2.0
狗牙根	<i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pers.	4.0~8.7	1.0~2.2
结缕草	<i>Zoysia japonica</i> Steud.	4.8~7.6	1.3~2.1
草地早熟禾	<i>Poa pratensis</i> L.	4.1~6.6	1.1~1.8

表3 草坪草夏季平均蒸散率 (1993年以前的报道总结)<sup>[19]</sup>Table 3 Mean summer evapotranspiration rates of turfgrass (The summary of the reports result before 1993)<sup>[19]</sup>

草种		夏季平均蒸散率	相对排序
冷季型草	暖季型草	mm/d	
	野牛草	5~7	很低
	杂交狗牙根	3.1~7	低
	假俭草	3.8~9	
	普通狗牙根	3~9	
	结缕草	3.5~8	
硬羊茅		7~8.5	中等
邱氏羊茅		7~8.5	
紫羊茅		7~8.5	
	美洲雀稗	6~8.5	
	海滨雀稗	6~8.5	
	钝叶草	3.3~6.9	
多年生黑麦草		6.6~11.2	高
	地毯草		8.8~10
	狼尾草		8.5~10
高羊茅			3.6~12.6
匍匐翦股颖			5~10
一年生早熟禾			>10
草地早熟禾			4, >10
多花黑麦草			>10

草坪蒸散率在不同草种间、同一草种的不同品种间以及不同地区相同的品种间都存在不同程度的差异。在草坪草中选择低耗水草种,降低草坪耗水量具有相当大的潜力空间。

表3总结的草坪蒸散率大多是使用小型蒸渗仪在田间或室内且土壤水分充足的条件下测定的。毋庸置疑这种方法测定的数值可以较准确地反映当地特定草种草坪的最大蒸散率。但在草坪的实际管理中不可能始终保证草坪充足供水,草坪的根系在田间土壤中的分布与蒸渗仪小桶内的分布也有差别,实际草坪蒸散率比最大草坪蒸散率往往相差较大。Carrow<sup>[9]</sup>通过测定草坪土壤水分含量,利用土壤水分平衡法计算得出美国东南部较湿润地区7种常用草坪草种的草坪蒸散率。测量过程中的土壤水分条件为日常草坪管理的状态,允许土壤水分亏缺的出现。狗牙根(Tifway)草坪夏季平均蒸散率为3.11mm,普通狗牙根为3.03mm,结缕草(Meyer)为3.54mm,普通假俭草为3.80mm,钝叶草(Raleigh)为3.28mm,高羊茅(Rebel II)为3.57mm,高羊茅(Kentucky-31)为3.69mm。比在干旱半干旱地区、土壤水分充足的条件下测定的相应草种的夏季日平均蒸散率低40%~60%。

20世纪90年代初,在美国大部分地区,大多数草种蒸散率的测定已经基本完成。虽然传统的测定蒸散率的研究对于新的草坪草种、品种还须持续进行,但草坪蒸散研究的重点已逐渐转移到种内水平,同时草坪研究者更加关注如何利用蒸散研究去指导更有效的草坪水分管理的实践。

## 1.2 草种内品种的草坪蒸散率

很多研究表明同种草坪草的不同品种的草坪蒸散率存在差异<sup>[2,4,11,17-23]</sup>,并且品种间差异的程度不亚于种间<sup>[22]</sup>。这虽然为选育低耗水品种提供了非常大的可能性,但由于草坪的

蒸散率受诸多因素的影响, 草坪研究者很难找到稳定的, 可行的大量筛选节水品种的标记性状。不过草坪草种内品种的蒸散率及相关性状的研究, 使人们对草坪的耗水特性有了更深入的认识。

### 1.2.1 冷季型草坪草

Shearman<sup>[22]</sup>在内布拉斯加对 20 个草地早熟禾品种的蒸散率研究表明: 蒸散率最低的品种为 Enable, 3.86mm/d; 蒸散率最高的品种为 Birka、Sydsport 和 Merion, 6.34mm/d。25℃条件下, 不同品种草坪的茎密度、根密度、留茬量 (verdure)、叶片的气孔密度及气孔指数 (气孔数占表皮细胞数的比例) 均有差别, 但只有留茬量与品种的蒸散率显著正相关。当温度由 25℃ 升至 35℃ 时, 品种的蒸散量会增加 1.1 ~ 1.7 倍。但 25℃ 条件下的品种蒸散率排序和 35℃ 时的并不相关, 如 Sydsport 的蒸散率在 25℃ 时为 7.15mm/d, 排在第一位; 而在 35℃ 时为 8.17mm/d, 仅处于中等水平。并且, 35℃ 条件下, 品种的蒸散率和叶片垂直生长速率正相关, 和茎密度及留茬量负相关。Park 和 S. Dakata 35℃ 时的蒸散率高达 10.36 和 10.43mm/d, 它们的叶片垂直生长很快, 冠层密度较低, 降低了冠层阻力, 使蒸散量增大。

Beard<sup>[4]</sup>也发现气候条件的变化会影响草地早熟禾种内不同品种草坪蒸散率的大小排序。最近的研究<sup>[24]</sup>表明草地早熟禾种内 61 个品种的蒸散率的差异有 87% 归因于环境蒸发力的变化, 品种的蒸散特性很不稳定。

人们曾认为高羊茅的草坪型品种比牧草型品种耗水多且抗旱性差。Kopec 和 Bowman 等<sup>[11,21]</sup>分别在田间和室内的高羊茅品种蒸散率比较研究证实了这个想法是错误的。

田间利用小型蒸渗仪测定的结果表明, 高羊茅 6 个品种中, 草坪型品种 (Hundog、Adventure、Rebel、Mustang) 的平均日蒸散率为 6.6mm, 牧草型品种 (Kenhy、Kentucky-31) 为 7.2mm, 品种间蒸散率差异程度为 18%。Kenhy、Kentucky-31 的蒸散率最高, Rebel、Mustang 的最低, Adventure 居中, 但品种的抗旱性和蒸散率并未表现出相关性。Rebel、Mustang 在土壤可利用水分含量很高时便发生了萎蔫, Adventure 却能忍耐较大程度的土壤水分亏缺。

在温室条件下, 高羊茅牧草型品种的蒸散量也大于草坪型品种, 同时发现草坪草的生长对品种的蒸散率影响很大。实验中使用了 20 个品种。修剪后第一天的蒸散率比第七天的低 22% 左右, 蒸散率的大小排序也有变化。修剪后第一天的蒸散率最高的为 Maverick, 9.8mm/d, 最低的为 Mesa, 8.5mm/d; 修剪后第七天的蒸散率最高的为 Alta, 13.5mm/d, 最低的为 Murietta、Silverado 和 Shortstop, 10.0mm/d。第七天各个品种的蒸散率和它们的草屑产量 (clipping yield) 呈正相关。进一步的较长期观测 (两个月) 表明短期内 (7 天) 测定的高羊茅品种的蒸散率比较稳定。短期室内蒸散量的比较有可能成为低耗水高羊茅草坪品种筛选的有效方法。

### 1.2.2 暖季型草坪草

与冷季型草坪草相比, 暖季型草坪草的种内品种草坪蒸散率的差异程度较小<sup>[11,20,22,25]</sup>。

Beard<sup>[20]</sup>测定了 24 个狗牙根品种的蒸散率, 1984 ~ 1986 年 3 个生长季的测定结果表明所有品种中蒸散率最低的为 A-22、A-29 和 Tufcote, 4.2mm/d, 最高的为 Sunturf, 5.2mm。差异程度仅为 1mm。这与 Kim and Beard<sup>[14]</sup>测定的暖季型草坪草种的蒸散率差异程度 (1.2mm) 很接近。Green et al. 和 Atkins et al.<sup>[26,27]</sup>对结缕草和钝叶草品种的研究也得出相似的结论, 种内品种间的蒸散率几乎没有差异。

人们已经发现一些冷季型草的品种的蒸散率与叶的垂直生长量正相关<sup>[21,22]</sup>，对暖季型草却没有发现相似的规律。狗牙根<sup>[20]</sup>、结缕草<sup>[26]</sup>、钝叶草<sup>[27]</sup>的品种的叶片生长量都不能作为其草坪蒸散率的稳定指示标记。和抗旱性结合起来的一些植物水分关系参数可能对选择低耗水品种更有价值<sup>[17]</sup>。

大多数品种的蒸散率是在土壤水分充足时测定的。所测得的仅是草坪实际耗水曲线的初始值<sup>[18]</sup>。随着土壤水分含量的下降，草坪的蒸散率逐渐下降<sup>[2,28]</sup>。Keenbone 和 Pepper<sup>[29]</sup>也报道狗牙根草坪的耗水量在每天灌溉 52mm 比灌溉 16mm 高 70%。在土壤水分亏缺的条件下，草坪品种的蒸散会表现出与水分充足时不同的特征。评价草坪品种的耗水量应考虑到土壤水分条件的变化<sup>[18,20]</sup>。

## 2 草坪蒸散机制的研究

草坪的蒸散是经由土壤—植物—大气连续体的动态水分传输过程。尽管土壤—植物—大气连续体中各个部分水分传输的介质不同、界面不一，但从物理学角度它可以看作是一个连续的统一体系，其中，土壤为水的源，大气为水的库。从源到库，水的自由能逐渐降低，形成由低到高的水势梯度，成为推动水分传输的主动动力。水流通量取决于水势梯度和水流阻力<sup>[4,3,31]</sup>。连续体中任何一部分状态的变化都会影响草坪蒸散。

正常生长的草坪植物群体具有非常大的密度和盖度，蒸散发生的主要界面处于植物茎叶表面与大气之间。水分从草坪草蒸发到大气中可以经由茎叶表皮的气孔和角质层两个途径。但角质层对水分传输的阻力非常大，因此气孔成为草坪蒸散的主要通道。

草坪蒸散中水分从茎叶到大气的传输阻力主要包括 3 方面。可以用下式表示： $R_t = R_a + R_c + R_i$ ，其中， $R_t$  为总阻力； $R_a$  是水蒸气在冠层与大气之间传输时遇到的湍流交换阻力，也称为空气动力学阻力； $R_c$  为水蒸气在冠层内扩散的阻力，称冠层阻力； $R_i$  为水分在叶片内传输的阻力，称气孔阻力或内部阻力。与  $R_t$  相对应， $R_a$  和  $R_c$  是蒸散的外部阻力。

### 2.1 草坪的冠层特征与草坪蒸散

草坪的冠层是草坪蒸散的一个主要外部条件。草坪冠层的特征包括草坪茎叶的密度、叶面积、叶片的伸展方向和生长速率。茎叶平展且密度高的草坪冠层会阻碍水蒸气的上升扩散，同时也会减少冠层与大气之间的湍流交换，从而增加了草坪冠层中的水汽量，降低草坪内外的水汽压差使草坪的蒸散减弱，反之则会增强草坪蒸散<sup>[4]</sup>。

Johns et al.<sup>[32]</sup> 定量研究了钝叶草的草坪蒸散阻力，发现水分充足条件下，钝叶草草坪的内部阻力 ( $R_i$ ) 仅为外部阻力 ( $R_a + R_c$ ) 的 1/4 到 1/2；并且当风速为 0.6m/s 时，钝叶草的实际蒸散和用修正的彭曼公式计算的潜在蒸散非常接近。他们认为土壤水分充足时，钝叶草的蒸散主要受外部条件——冠层及大气状况的控制，而植物体的生理状态和叶片内部结构对蒸散的影响不大。他们的结论和 Van Bavel<sup>[33,34]</sup> 在苜蓿上及 Van Bavel 和 Ehrler<sup>[35]</sup> 在高粱上获得的结果很相近。

不同草种的草坪蒸散率和相对应的草坪植物形态学特征的进一步研究<sup>[14]</sup> 表明具有较低蒸散率的草坪往往具备以下冠层特征：①高冠层阻力——较高的茎叶密度和相对较平展的叶片；②低叶面积——叶片狭窄，且生长缓慢。Devitt 和 Morris<sup>[36]</sup>，及 Green 等<sup>[37]</sup> 也报道了较慢的冠层生长与较低的草坪蒸散量有很大相关性。与之相对应，许多研究表明高留茬修剪或高施氮肥所导致的草坪茎叶快速生长和高蒸散量紧密相关<sup>[6,14,38-40]</sup>。

由此看来, 草坪的冠层特征对草坪蒸散的影响是很有规律的。但冠层特征对草坪蒸散的影响是随草种和品种的不同而变化的。尤其在草种内的品种间, 土壤水分充足时, 冷季型草坪草品种的草坪蒸散量和冠层特征高度相关<sup>[21,22,25,41]</sup>; 而所见报道的暖季型草坪草品种的草坪蒸散量和冠层特征相关性不大<sup>[20,26,27]</sup>。

草坪的冠层特征和草坪蒸散的关系比较复杂, 它仅仅是影响草坪蒸散众多因素中的一个方面, 不能简单的以冠层特征来判断草坪耗水量的大小。但对于一些草种如某些冷季型草, 其冠层特征和蒸散的相关性很大, 综合利用这些冠层指标可以为选育和应用低耗水草坪草种提供有效的手段<sup>[15,42]</sup>。从另一方面来看, 草坪的冠层密度、生长量等冠层特征很易受养护管理措施的影响, 从而影响草坪耗水量。人们可以通过合理的养护管理降低草坪的耗水量, 促进节水。

## 2.2 气孔与草坪蒸散

虽然气孔仅占叶片总面积的 1% 左右, 但它在植物的蒸腾中发挥着非常重要的作用。John et al.<sup>[32]</sup> 发现土壤水分充足时, 钝叶草的 20% ~ 30% 的蒸散是受气孔控制的。但蒸散的气孔阻力比湍流阻力和冠层阻力小很多。

不同的草坪草种和品种的叶片气孔数目有很大差别 (表 4)。冷季型草坪草叶片的气孔主要分布在正面, 背面的气孔数目明显少于正面。叶片正、背面气孔的数目没有相关性<sup>[23,37,43]</sup>。暖季型草坪草的叶片正、背面的气孔数目一般相差不大, 背面的气孔数目略小于正面, 并且二者之间有一定的相关性, 叶片正面气孔数目多的草种往往背面气孔也较多<sup>[26,27,44]</sup>。

表 4 草坪草的叶片气孔密度和蒸散率<sup>[26,27,37]</sup>

Table 4 Stomatal density of leaf blades and evapotranspiration for turfgrass<sup>[26,27,37]</sup>

草坪草种		品 种	气孔密度 (个/mm <sup>2</sup> )		蒸散率 (mm/d)
冷季型	暖季型		叶片正面	叶片反面	
硬羊茅		Waldina	203	0	7.4
匍匐剪股颖		Penncross	176	100	10.1
羊茅		Big Horn	147	0	9.3
丘氏羊茅		Jamestown	142	0	7.7
一年生早熟禾		—	135	71	9.8
草地早熟禾		Bensun	125	41	12.4
多年生黑麦草		Manhattan	125	17	9.1
高羊茅		Rebel	88	46	11.4
粗茎早熟禾		Sabre	87	0	8.4
草地早熟禾		Majestic	79	37	11.9
草地早熟禾		Merion	73	24	12.4
高羊茅		K-31	68	55	9.9
	钝叶草	Texas Common	246	107	6.7
		TXSA 8218	179	71	8.1
	结缕草	PI 231146	526	344	9.5
		Meyer	451	279	9.9

土壤水分不受限制时, 不同的暖季型草坪草种间的草坪蒸散与叶片背面的气孔密度显著

负相关<sup>[44]</sup>，但在种内品种间没有表现出相关性<sup>[26,27]</sup>。冷季型草坪草种间和种内的叶片气孔数目和草坪的蒸散不相关<sup>[22,37]</sup>。

除叶片的气孔数目外，气孔的形状、大小、开闭状态、气孔在叶片上的位置及叶片角质层的厚度、表皮细胞的特征等均会影响草坪的蒸散。细化气孔与蒸散关系的研究也许会发现一些规律性现象。另外，土壤水分亏缺时气孔对植物的蒸散的影响会变大。在适当干旱的条件下，草坪蒸散与气孔的关系如何，未见报道。

### 2.3 土壤水分与草坪蒸散

土壤中的水分是草坪蒸散的源，当土壤水分含量降低到一定程度时，草坪的根系不能吸收到足够的水分维持正常的蒸散，同时，叶片的气孔关闭急剧增大了蒸散的气孔阻力，草坪的蒸散量会迅速降低。在此之前，草坪的蒸散会稳定地维持在较高的水平，不受土壤水分含量变化的影响。

Ekern<sup>[8]</sup>报道在夏威夷，土壤（Wahiawa 粉质黏土）的含水量高于 30%（水势大于 100kPa）时，狗牙根草坪可维持较高蒸散量。当土壤含水量下降至 26%（水势大于 1500kPa）时，草坪的蒸散量略有降低。当土壤含水量低于 26% 时，草坪的蒸散量迅速下降。

Biran 等<sup>[6]</sup>在室内控制条件下，用开放气体交换系统测定的结果与 Ekern 的结果很接近。他们观测了 4 种草坪草的蒸散量随土壤水分降低而变化的情况。草种为钝叶草、狗牙根、结缕草和高羊茅，土壤为等体积混合的砂壤土、泥炭和火山灰。当土壤水势大于 -100kPa 时，4 种草坪草的蒸散量都较稳定地保持在较高值。随土壤水势的降低，结缕草在 -880kPa 时蒸散量迅速下降，而其他 3 种草坪草的蒸散量在 -1400kPa 时才降低。

在较长时间的土壤干旱后的大量灌水会导致草坪蒸散量的极大升高，甚至高于未发生土壤干旱前的蒸散量<sup>[45]</sup>。草坪蒸散量的这种变化一部分归因于草坪草蒸腾的迅速恢复，另一部分决定于草坪生长环境水分条件的极大变化。Kneebone 等<sup>[46]</sup>认为草坪具有奢侈耗水的特性。当土壤中的水分含量过多时，草坪的蒸散量会随之加大。他们的研究表明，当狗牙根草坪的灌溉量为蒸发皿蒸发量的 254%、540% 和 808% 时，相对应的草坪蒸散量分别为蒸发皿蒸发量的 68%、109% 和 119%。

### 2.4 草坪蒸散和 C<sub>3</sub>、C<sub>4</sub> 代谢途径

大量草坪蒸散量的测定已清楚地表明暖季型草坪草的草坪蒸散量低于冷季型草坪草<sup>[19]</sup>。大多数暖季型草坪草属于 C<sub>4</sub> 植物而大多数冷季型草坪草为 C<sub>3</sub> 植物。C<sub>3</sub>、C<sub>4</sub> 代谢途径对草坪蒸散的作用机制的研究未见很多。Biran<sup>[6]</sup>（1981）的研究表明在生长速率相同时，C<sub>3</sub> 植物高羊茅的耗水量远远高于属于 C<sub>4</sub> 植物的 9 种暖季型草坪草。温度为 34.5℃ 时，C<sub>3</sub> 草坪草和 C<sub>4</sub> 草坪草的蒸腾率很接近，但 C<sub>3</sub> 草坪草的净光合效率仅为 C<sub>4</sub> 草坪草的 1/3。这与 C<sub>3</sub>、C<sub>4</sub> 植物的光合特性是相吻合的<sup>[47]</sup>。植物在利用光能进行光合作用时从气孔吸入 CO<sub>2</sub> 的量与植物进行蒸腾作用时释放到环境中的水汽量是正相关的，吸入的 CO<sub>2</sub> 越多，蒸腾的水汽量越大。C<sub>4</sub> 植物具有效率极高的固定碳的代谢途径，它可以充分利用植物吸收的 CO<sub>2</sub>，而 C<sub>3</sub> 植物的碳固定效率较低。所以，固定等量的碳，C<sub>3</sub> 植物比 C<sub>4</sub> 植物需要吸收较多的 CO<sub>2</sub>，而蒸腾较多的水分。

## 3 草坪合理灌溉的研究

合理灌溉是草坪节水的主要措施之一。不同地区、不同草种草坪的水分需求量不同。根

据草坪的实际水分需求适时适量灌溉, 实现节水与草坪质量、功能维持的统一是草坪合理灌溉的核心。

草坪蒸散量为草坪管理者提供了草坪水分需求的基本数据。实测的蒸散量 ( $ET_a$ ) 和经验公式推算的潜在蒸散量 ( $ET_o$ ) 相比, 获得适用于指导特定地区、特定草种灌溉的作物系数 ( $k$ ), 是草坪合理灌溉的前提。另外, 受环境条件、草坪耗水量及抗旱性等因素的影响, 草坪的灌溉时机具有不稳定性, 难于把握。近年来, 人们对草坪合理灌溉的研究主要集中在灌溉量的确定和灌溉时机的把握两个方面。

### 3.1 草坪最适灌溉量

联合国粮食与农业组织 (FAO) 定义作物的需水量为“作物生长在开阔的田地, 土壤的水、肥条件不受限制, 在所处的气候环境中充分发挥生产潜力时, 满足作物蒸散耗水所需的水分量”。因此, 作物的需水量是指作物的最大实际蒸散量<sup>[48]</sup>。它和作物的生产潜力 (籽实或营养体的产量、作物的生长量) 相联系。草坪作为一种园林地被, 其最主要的功能是环境保护和美化, 草坪草的生长量只是草坪发挥功能的一个前提并不是草坪管理的目标。有时, 为了节省养护成本人们还采取一些措施减缓草坪的生长<sup>[49]</sup>。因此, 确定草坪需水量的标准是草坪质量及其功能的维持。很多情况下如对绿地草坪、设施草坪等, 允许一定干旱胁迫时期的存在, 这增加了草坪节水的潜力。

草坪最适灌溉量是指特定气候条件下, 维持一定的草坪质量和功能所需的最小灌溉量。最适灌溉量可通过测定特定的管理条件下草坪的蒸散量获得。确定了最适灌溉量, 便可利用下面的公式计算具体地区的作物系数, 用于指导草坪灌溉。

$$k = ET_a / ET_o$$

其中,  $k$  为作物系数;  $ET_a$  为实测的草坪蒸散量;  $ET_o$  为利用气象数据通过经验公式推算的潜在蒸散量。潜在蒸散量 ( $ET_o$ ) 是一种假设的理论最大蒸散量, 又称参照作物蒸散量。它是一种开阔草地的蒸散量, 这种草地的土壤水分充足, 冠层高度为 8~15cm, 高矮均一, 正常生长的植株完全覆盖地表<sup>[50]</sup>。确定了草坪的作物系数, 便可利用公式  $ET_a = k \times ET_o$  反推出特定地区具体时间草坪的实际需水量, 将之反馈应用到草坪灌溉中, 指导水分管理。这种基于草坪作物系数的反馈系统 (feedback system) 灌溉方法已在很多地区应用<sup>[5,9,51-55]</sup>。在干旱地区, 利用反馈系统灌溉草坪和传统灌溉方法相比每年可节水 136~152mm, 并且可以最大程度减小干旱胁迫对草坪质量的影响<sup>[54]</sup>。

一个地区的最适灌溉量可以通过不同的方法测得。近些年来研究较多的有两种方法。一种是固定草坪的水分管理水平, 直接测定维持在一定质量下的草坪蒸散量 ( $ET_a$ ) 作为最适灌溉量; 另一种是根据计算的潜在蒸散量 ( $ET_o$ ) 设定不同的水分管理, 观测草坪质量的变化, 对耗水量和质量综合分析获得最适灌溉量。在较早期的研究中, 用于计算作物系数的  $ET_o$  大多是利用小型蒸渗仪在水分充足的条件下测定的<sup>[13,20,21,26,27]</sup>。这种方法成本较低, 简便易行, 测定条件一致, 不同的地区可以进行比较。另外, 土壤水分充足时的实测草坪蒸散率即相当于草坪的潜在蒸散率, 可以用来评价不同经验公式计算的  $ET_o$  的准确性<sup>[5,9,54]</sup>。但是, 土壤水分充足的条件很难代表大多数草坪水分管理的实际状况, 在草坪的灌溉周期中总会存在不同程度的水分亏缺, 基于这种土壤水分条件的  $ET_o$  低于水分充足时的蒸散率测定值, 这种数据对草坪节水更有价值<sup>[9,55,56]</sup>。

Feldhake et al.<sup>[57]</sup> 发现在美国西部干旱地区, 草坪的质量随蒸散量的降低而变差。当蒸

散量低于潜在蒸散量 73% 时, 草地早熟禾和高羊茅草坪的质量会降低 10%。但是, 草坪的蒸散量维持在潜在蒸散量的 73% 以上时, 草坪质量随蒸散量降低的变化很小。少于 27% 蒸散量的亏缺会减缓草坪的生长, 但对质量的影响很小。Beach<sup>[58]</sup> 也发现了相近的结果。他们的研究为通过评价分析草坪质量与灌溉量的关系来确定最适蒸散量提供了基础。

最近的研究中<sup>[51,52]</sup>, 草坪研究者主要使用线性梯度灌溉系统 (LGIS 或 LSIS) 在田间较长时期实地观测评价灌溉量与草坪质量的关系, 从而确定最适灌溉量。线性梯度灌溉系统<sup>[59,60]</sup> 是由间隔一定距离呈直线排列的喷头组成的喷灌系统, 通过调节供水强度, 可以在田间条件下产生稳定均匀的灌溉量梯度。Ervin et al.<sup>[51]</sup> 的研究表明在美国的 Colorado 州, 当草坪的质量维持在可接受的水平时, 以彭曼公式推测的苜蓿的潜在蒸散量为参照蒸散量, 高羊茅草坪的作物系数为 0.60 ~ 0.80, 草地早熟禾草坪的作物系数为 0.50 ~ 0.80。Qian Y. L. et al.<sup>[52]</sup> 发现在美国德克萨斯州, 维持 5 种草坪草最低可接受草坪质量的作物系数 (以 Class A 蒸发皿蒸发量为参照蒸发量) 分别为高羊茅 (Rebel II) 0.67; 结缕草 (Meyer) 0.68; 钝叶草 (Nortam) 0.44; 杂交狗牙根 (Tifway) 0.35; 野牛草 (Prairie) 0.26。

利用蒸散量反馈系统指导草坪灌溉时应注意草坪作物系数的不稳定性。作物系数从  $ET_a/ET_c$  求得, 任何影响  $ET_a$  和  $ET_c$  因素都有可能使作物系数发生变化。Devitt et al.<sup>[61]</sup> 比较了美国东南部干旱地区 3 个地方利用彭曼公式推算的  $ET_c$ , 发现月平均风速和相对湿度的差异可导致 3 个地方的夏季月平均  $ET_c$  相差 7% ~ 18%。Carrow<sup>[9]</sup> 指出美国东南部湿润地区杂交狗牙根 (Tifway)、普通狗牙根、结缕草 (Meyer)、假俭草、钝叶草 (Raleigh)、高羊茅 (Rebel II) 和高羊茅 (kentucky-31) 的作物系数高与干旱、半干旱地区。并且每个草种的作物系数都随季节有很大变化, 杂交狗牙根 (Tifway) 的变动最小为 0.53 ~ 0.97, 结缕草 (Meyer) 的变动最大为 0.51 ~ 1.14。暖季型草坪草的作物系数随草种变异很大, 不能归为一类作物系数使用。他建议, 人们应依据草种和每月的作物系数计算灌溉量。Aronson et al.<sup>[13]</sup> 也发现了美国南方湿润地区草坪作物系数在季节间的变动性, 但这种变动性因计算时使用的参照潜在蒸散量而异。利用彭曼公式推算的参照潜在蒸散量比蒸发皿蒸散量更稳定, 可以为灌溉提供可靠的数据。

另外草坪的作物系数还会受草坪的施肥、修剪高度、养护管理水平的影响<sup>[9,54]</sup>。再有, 蒸散量反馈系统可以比较精确地确定草坪的灌溉量, 但在田间实施灌溉时, 还必须考虑到草坪根系的深度、吸水能力和土壤的持水能力、排水性<sup>[62]</sup>。

### 3.2 草坪灌溉的时机

草坪的耗水过程发生在土壤—植物—大气连续体中, 草坪管理者可以从土壤水分含量、大气的蒸发需求和植物的水分状态来判断草坪的灌溉时机<sup>[62]</sup>。已经证明利用土壤张力计测定土壤水势和使用蒸发皿测定大气蒸发量来指导草坪灌溉有很大的节水潜力<sup>[63,64]</sup>, 但在实际应用中这两种方法有他们的局限性, 并且和土壤、大气相比, 植物本身的水分状态同时反映了土壤和环境的水分状况, 更能较全面地体现草坪的水分需求<sup>[65,66]</sup>。近些年来, 许多草坪研究者致力以草坪冠层温度为指标确定灌溉时机的研究<sup>[65-68]</sup>。

在土壤水分充足的条件下, 草坪草的蒸腾作用能降低叶片的温度使冠层温度低于 (或接近) 其周围的气温, 随着土壤水分亏缺的加重, 草坪草的蒸腾作用逐渐减弱, 叶片的温度逐渐升高。如果蒸腾作用强烈减弱, 甚至停止, 草坪草的冠层会因吸收太阳辐射而使其温度高于周围的气温<sup>[66]</sup>。红外测温仪可以在大区域内和不同的水分胁迫水平, 方便快速地测



定冠层温度，这促进了冠层温度在作物干旱胁迫评价中的应用<sup>[69]</sup>。较早的基于冠层温度 ( $T_c$ ) 和气温 ( $T_a$ ) 差值的灌溉决策研究主要以作物为研究对象<sup>[70-73]</sup>。Throssell et al.<sup>[66]</sup> 基于草地早熟禾草坪冠层温度的研究将“胁迫程度积温 ( $SDD$ )”、“作物水分胁迫系数 ( $CWSI$ )”和“水分临界点模型 ( $CPM$ )”引入草坪的灌溉时机决策，并把这些方法的效果和土壤张力计法进行了比较。

用于确定灌溉的  $SDD$  公式<sup>[73]</sup>为：

$$SDD = \sum_{n=i}^N (T_c - T_a)_n$$

植物的冠层温度为  $T_c$ ，冠层周围的气温为  $T_a$ ， $i$  为灌溉后的第一天， $N$  为  $SDD$  达到预定值时的天数。当  $(T_c - T_a) < 0$  时，假定其值为零。 $SDD$  值的增大表明植物水分胁迫的增强，可以根据具体情况确定  $SDD$  达到一定值时进行灌溉。

考虑到环境因素（水汽压差、温度）对  $SDD$  的影响，Idso et al.<sup>[74]</sup> 根据经验观察的结果提出，在水分充足时， $(T_c - T_a)$  与水汽压差 ( $VPD$ ) 之间存在着线性相关的关系，并把这种关系称为无水分胁迫基准线 (non-water-stressed baseline)。同时提出作物水分胁迫系数 ( $CWSI$ )，其公式为：

$$CWSI = (\Delta T_m - \Delta T_{min}) / (\Delta T_{max} - \Delta T_{min})$$

$\Delta T_m$  是测定的  $T_c - T_a$ ， $\Delta T_{min}$  是在供水充足和当时测定的水汽压差下，植物蒸腾作用最大时的  $T_c - T_a$ ， $\Delta T_{max}$  是在当时测定的环境气温下，植物蒸腾作用极度减弱或停止时的  $T_c - T_a$ 。当植物的蒸腾从最大降到最低时， $CWSI$  会从 0 变为 1。人们可以根据经验或试验设定一个  $CWSI$  值，当达到该值时进行灌溉。

临界点模型 ( $CPW$ ) 则是使用土壤和环境参数预测  $T_c - T_a$ 。然后把它和实测的  $T_c - T_a$  比较，如果实测的  $T_c - T_a$  比预测的高，则应灌溉。

Throssell et al.<sup>[66]</sup> 发现利用这 3 种方法和用张力计法确定的灌溉次数多，总用水量大。 $SDD$  法和  $CWSI$  法所确定的灌溉比较接近于张力计法。他们认为这可能由于冠层温度对草坪水分状况的反应比较灵敏，所以导致了灌溉次数的增多。另外由于  $CWSI$  考虑了环境因素，可以用于其他地区，更适于指导草坪灌溉，但仍需进一步调整改进。

Jalali-Farahani et al.<sup>[67,68]</sup> 利用田间测定的数据更深入地研究了草坪的  $CWSI$ 。他们发现  $CWSI$  受净辐射的影响也很大，并且比较了基于经验的和基于能量平衡理论的  $CWSI$  模型<sup>[74]</sup>。后者预测的精度更高，指出对于狗牙根草坪，午时  $CWSI$  为 0.16 时应灌溉草坪。冠层温度作为确定灌溉时机的指标的应用还处于发展阶段， $CWSI$  在不同的季节和不同的草种间表现不稳定，并且这种方法的节水效果也表现不一<sup>[65,67]</sup>。但这种方法以草坪植物本身为主体，更合理的体现了草坪的水分需求状态，是一种理想的草坪灌溉时机确定方法。

## 4 结语

草坪蒸散研究是草坪节水的基础。几十年来，国外在这个领域进行了比较深入的研究，并应用于抗旱、低耗水草种筛选、草坪合理灌溉和综合节水养护管理等方面。草坪蒸散的特征受气候、土壤等环境因子强烈影响，我们可以借鉴国外的草坪水分管理经验和研究成果，但必须以了解我国草坪的水分需求规律为前提，因地制宜。非常遗憾，我国草坪科研水平远远落后于草坪业的飞速发展。目前，我国干旱、半干旱地区城市用水短缺已成为限制草坪业