

草坪蒸散研究进展

赵炳祥¹, 陈佐忠¹, 胡 林^{2*}, 张福锁²

(1. 中国科学院植物研究所, 北京 100093; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094)

摘要: 草坪蒸散量是指导草坪合理灌溉的重要指标。自 20 世纪中叶以来, 以节水为目的的草坪蒸散研究越来越受到人们的重视。草坪蒸散研究的内容主要包括相互关联的 3 个方面: 草坪蒸散率的测定与比较, 草坪蒸散机制的研究和草坪节水灌溉的研究。草坪蒸散率在不同草种间存在不同程度的差异。暖季型草坪草和冷季型草坪草相比普遍具有较低的草坪蒸散率。暖季型草坪草的夏季日平均最大蒸散率为 3.0~9.0mm, 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、1 年生早熟禾和匍匐剪股颖的耗水量很大。同种草坪草的不同品种的草坪蒸散率存在差异。有些草种内品种间差异的程度高达 64%, 不亚于种间。冷季型草坪草品种的蒸散率与留茬量显著相关, 但环境因子对品种的蒸散率影响很大, 品种的蒸散特性不稳定。与冷季型草坪草相比, 暖季型草坪草的种内品种间蒸散率的差异程度较小。草坪的冠层是草坪蒸散的一个主要外部条件, 具有较低蒸散率的草坪往往具备高冠层阻力和低叶面积。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率与叶片背面的气孔密度显著负相关。但在种内品种间没有表现出相关性。冷季型草坪草种间和种内的叶片气孔数目和草坪的蒸散率不相关。草坪的作物系数是确定最适灌溉量的关键参数, 线性梯度灌溉系统比小型蒸渗仪提供的草坪作物系数更接近于实际。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。基于草坪冠层温度的作物水分胁迫系数(CWSI)是确定灌溉时机的比较合理的指标。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, 还处于发展阶段。草坪蒸散的研究在我国几乎处于空白状态, 开展我国的草坪蒸散研究, 寻求适合的草坪节水途径已势在必行。

关键词: 草坪蒸散; 草坪蒸散率; 冠层特征; 暖季型草坪草; 冷季型草坪草; 草坪合理灌溉

Turfgrass evapotranspiration: a review

ZHAO Bing-Xiang¹, CHEN Zuo-Zhong¹, HU Lin², ZHANG Fu-Suo² (1. Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China; 2. College of Resource and Environment, China Agriculture University, Beijing 100094, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(1): 148~157.

Abstract: Turfgrass evapotranspiration (ET) is an important index for turfgrass irrigation. Since the

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目(6001001); 中美合作草坪养护管理研究项目、由俄勒冈种子理事会(OSC MAP)资助

收稿日期: 2001-09-29; **修订日期:** 2002-06-08

作者简介: 赵炳祥(1971~), 男, 硕士, 讲师。主要从事植物学, 植物生态学, 草坪学研究。bx_zhao@hotmail.com

* 通讯作者 Author for correspondence, hulin@mail.cau.edu.cn

Foundation item: Natural Scientific Foundation of Beijing (No. 6001001); China-America turfgrass research program, supported by Oregon Seed Council(OSC MAP)

Received date: 2001-09-29; **Accepted date:** 2002-06-08

Biography: ZHAO Bing-Xiang, Master, Lecturer. Main research areas include: botany, plant ecology, and turfgrass science and management. bx_zhao@hotmail.com

middle of the 20th century, more and more studies of turfgrass ET have been conducted because of the shortage of water for irrigating turfgrass. The content of turfgrass ET research mainly include three aspects that related to each other: (i)Turfgrass ET rate measurement and comparison. (ii)Turfgrass ET mechanism study. (iii) Turfgrass water conservation study. There are major differences in the ET rates among most turfgrass species. Cool-season turfgrass species have higher ET rates than warm-season species. The range of ET rates for cool-season turfgrasses is 2.7 to 12.6 mm · d⁻¹ as compare to 3.0 to 10.0 mm · d⁻¹ for warm-season species. For cool-season species, the fine-leaved fescue ranked medium, while Kentucky bluegrass, annual bluegrass, and creeping bentgrass exhibited very high ET rates. For warm-season turfgrasses, high density, low growing species, such as hybrid bermudagrass, zoysiagrass, buffalograss, and centipedegrass, exhibited the lowest ET rates. The ET rates are also different on the intraspecific level. Reported ET rates for Kentucky bluegrass cultivars differed by as much as 64%, as great as that encountered at the interspecific level. Verdure is significantly correlated to ET rates of cool-season cultivars, but the intraspecific ET characterizations of turfgrass are variable between diverse evaporative environments. For warm-season species, the intraspecific ET difference is smaller as compare to cool-season turfgrass. Canopy characteristic is an important external factor that influences turfgrass ET. Turfgrasses with comparatively lower ET rates are generally characterized by having a high canopy resistance and a low leaf area. Under nonlimiting moisture conditions, there is a significant negative correlation between ET rate and abaxial stomata density on the interspecific level for warm-season species, but no correlation on intraspecific level. For cool-season turfgrass, stomata density is not reliably associated with ET rate both on inter and intraspecies. The crop coefficient is a key index to decide the optimum irrigation rate for turfgrass. The turfgrass crop coefficient based on Line-Source Irrigation System is more practical than that based on mini-lysimeter measurement. Research indicates that the crop coefficient of Kentucky bluegrass ranged from 0.60 to 0.80, and 0.50 to 0.80 for tall fescue, based on 1982 Kimberly-Penman equation estimates of potential ET, while maintaining acceptable turfgrass quality. And the significance of turfgrass ET study in China was emphasized. Crop water stress index (CWSI) based on canopy temperature is a reasonable index for irrigation timing. This is however variable because of the different turfgrass species and different seasons, and water conservation capacity also changeable. There is almost no turfgrass ET research in China untill now; the significance of turfgrass evapotranspiration study in China should be emphasized.

Key words: turfgrass evapotranspiration; turfgrass evapotranspiration rate; canopy character; cool-season turfgrass; warm-season turfgrass; turfgrass irrigation

文章编号:1000-0933(2003)01-0148-10 中图分类号:S688.4 文献标识码:A

蒸散(Evapotranspiration, ET)是植物群体与外界环境水分交换的一种非常普遍的现象。它包括了植物蒸腾和植物体表及植株间土壤的水分蒸发^[1]。在农业生产中,农田蒸散量是衡量作物耗水、指导灌溉的重要指标。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^[2]。草坪蒸散和大多数作物及牧草的蒸散有许多共性,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^[3]。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,人们愈来愈关注草坪的耗水问题,以节水为主要目的草坪蒸散研究逐渐发展起来^[4,5]。

值得注意的是,草坪是一种比较特殊的植物群体。与大部分农作物相比,它们的蒸散特征有一定差别。草坪地上部的茎叶密度很高,完全覆盖地表,蒸腾是草坪蒸散的主体,植株间土壤的蒸发量远远小于作物的棵间蒸发量,以致可以忽略不计^[6]。另外,作物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^[2];而养护管理得当的草坪,主要以营养生长为主,频繁的修剪使其冠层结构一般保持稳定,不同季节的气象条件成为影响草坪蒸散的主要因素。草坪有其独特的蒸散特性,与农作物相比其蒸散的复杂性相对较低^[1]。

草坪蒸散的研究主要包括相互联系的3个方面:(1)草坪蒸散率的测定与比较;(2)草坪蒸散机制的研究;(3)草坪节水方法的研究。草坪蒸散率的测定与比较是后两者的基础;草坪蒸散机制的阐明为草坪节水方法的开发和应用提供了理论依据;同时,草坪节水中的问题不断为草坪蒸散机制的研究提出新的课题。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

草坪的蒸散率(Evapotranspiration rate)是指单位面积,单位时间内草坪蒸散的水量,单位为 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 或 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。草坪蒸散率略小于草坪的耗水率。后者包括了草坪草生长中组织内的含水量。但在研究和实际应用中人们测定的主要是蒸散率,并常用它来表示草坪耗水量或草坪的水分需求^[1]。

1.1 种间水平的草坪蒸散率

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^[2,3,7,8]。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。

Beard^[2]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 $2.5 \sim 7.6 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,少数情况下可超过 $11.0 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。草种间和草坪品种间的耗水量各不相同,丘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^[11]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。

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重要进展。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^[9-13]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2)。暖季型草坪草和冷季型草坪草相比普遍具有较低的草坪蒸散率。暖季型草坪草的夏季日平均最大蒸散率为 $3.0 \sim 10.0 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,而冷季型草坪草的为 $2.7 \sim 12.6 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。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

表1 草坪蒸散率分级^[11]

Table 1 A classification of evapotranspiration rates for turfgrass^[11]

相对等级 Relative ranking	蒸散率 ET rate	
	$\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$	$\text{inch} \cdot \text{week}^{-1}$
很低 Very low	<4.0	<1.0
低 Low	$4.0 \sim 4.9$	$1.1 \sim 1.3$
较低 Medium-low	$5.0 \sim 5.9$	$1.4 \sim 1.6$
中等 Medium	$6.0 \sim 6.9$	$1.7 \sim 1.9$
较高 Medium-high	$7.0 \sim 7.9$	$2.0 \sim 2.2$
高 High	$8.0 \sim 8.9$	$2.3 \sim 2.5$
很高 Very high	>9.0	>2.5

水量中等,而草地早熟禾、高羊茅、1年生早熟禾和匍匐翦股颖的耗水量很大。

草坪蒸散率在不同草种间存在不同程度的差异。在草坪草中选择低耗水草种对草坪节水具有相当大的潜力。表2总结的草坪蒸散率大多是使用小型蒸渗仪在田间或室内,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比较准确地反映当地特定草种的最大草坪蒸散率。但在草坪的实际管理中不可能始终保证草坪充足供水;另外,草坪的根系在田间土壤中的分布与蒸渗仪内的分布也有差别,实际草坪蒸散率比利用这种方法测定的草坪蒸散率往往相差较大。Carrow^[9]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。结果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,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、品种还需持续进行,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。

1.2 种内水平的草坪蒸散率

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^[10-12]。有些品种间差异的程度不亚于种间^[11]。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。

表2 草坪草夏季平均蒸散率(据1996年以前的报道)^[9,16]

草种 Turfgrass species		夏季平均蒸散率(mm·d ⁻¹)	相对排序
冷季型草 Cool season	暖季型草 Warm season	Mean summer ET rate	Relative ranking
	野牛草 Buffalograss	5.0~7.0	很低 Very low
	杂交狗牙根 Bermudagrass hybrids	3.1~7.0	低 Low
	假俭草 Centipedegrass	3.8~9.0	
	普通狗牙根 Bermudagrass	3.0~9.0	
	结缕草 Zoysiagrass	3.5~10.0	
硬羊茅 Hard fescue		7.0~8.5	中等 Medium
邱氏羊茅 Chewings fescue		7.0~8.5	
紫羊茅 Red fescue		7.0~8.5	
	美洲雀稗 Bahiagrass	6.0~8.5	
	海滨雀稗 Seashore paspalum	6.0~8.5	
	钝叶草 St. augustinegrass	3.3~8.1	
多年生黑麦草 Perennial ryegrass		6.6~11.2	高 High
	地毯草 Carpetgrass	8.8~10.0	
	狼尾草 Kikuyugrass	8.5~10.0	
高羊茅 Tall fescue		2.7~12.6	
匍匐翦股颖 Creeping bentgrass		5.0~10.0	
一年生早熟禾 Annual bluegrass		>10.0	
草地早熟禾 Kentucky bluegrass		1.0, >10.0	
多花黑麦草 Italian ryegrass		>10.0	

1.2.1 冷季型草坪草 Shearman^[10]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⁻¹;蒸散率最高的品种为Birka, Sydsport 和 Merion, 6.34mm·d⁻¹。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,各品种的蒸散量会增加1.1~1.7倍。但25℃条件下,各品种蒸散率的排序和35℃时的并不相关,如Sydsport的蒸散率在25℃时为7.15mm·d⁻¹,排在第1位;而在35℃时为8.17mm·d⁻¹,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。

Beard^[4]也发现气候条件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。最近研究^[20]表明草地早熟禾 61 个品种的蒸散率的差异 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^[11, 18]分别在田间和室内的高羊茅品种蒸散率比较研究证实这个想法是错误的。田间利用小型蒸渗仪测定结果表明^[11],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 $6.6 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,牧草型品种(Kenhy、Kentucky-31)为 $7.2 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。在温室条件下^[12],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。

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^[11, 17, 19, 21]。

Beard^[11]测定了 24 个狗牙根品种的蒸散率,3 个生长季的测定结果表明所有品种中蒸散率最低的和最高的差异程度仅为 1mm。这与 Kim and Beard^[14]测定的暖季型草坪草种的蒸散率差异程度(1.2mm)很接近。Green 等和 Atkins 等^[22, 24]对结缕草和钝叶草品种的研究也发现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草坪蒸散率与叶的垂直生长量正相关^[18, 19],对暖季型草却没有发现相似的规律。狗牙根^[17]、结缕草^[22]、钝叶草^[23]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^[11]。

冷季型和暖季型草坪草的大多数品种的蒸散率是在土壤水分充足条件下测定的。所测得的仅是草坪实际耗水曲线的初始值^[1]。随着土壤水分含量的下降,草坪的蒸散率逐渐下降^[2]。Keenbone 和 Pepper^[21]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^[15, 17]。

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。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湍流交换阻力(空气动力学阻力 R_a),冠层阻力(R_c),和气孔阻力(内部阻力, R_i)。与 R_c 相对应, R_a 和 R_i 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汽的上升扩散,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,降低了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^[1]。

Johns 等^[25]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 $0.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 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。

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表明具有较低蒸散率的草坪往往具备以下冠层特征:(i)高冠层阻力——较高的茎叶密度和相对较平展的叶片;(ii)低叶面积——叶片狭窄,且生长缓慢。Devitt 和 Morris^[26],及 Green 等^[27]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^[1, 28]。

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力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^[18, 19, 21, 29];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^[17, 22, 24]。

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其中的一个方面。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^[30]。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等^[25]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^[22, 23, 27]。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^[27, 31]。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^[22, 23, 32]。

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^[42]。但在种内品种间没有表现出相关性^[22, 23]。冷季型草坪草种间及种内的叶片气孔数目和草坪的蒸散不相关^[19, 27]。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。土壤水分亏缺时气孔对植物的蒸散的影响会变大。有关气孔与草坪蒸散的关系,目前还没有得出明确的规律。

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^[8]报道在夏威夷,土壤(Wahiawa 粉质粘土)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^[6]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。

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^[33]。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^[21]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。

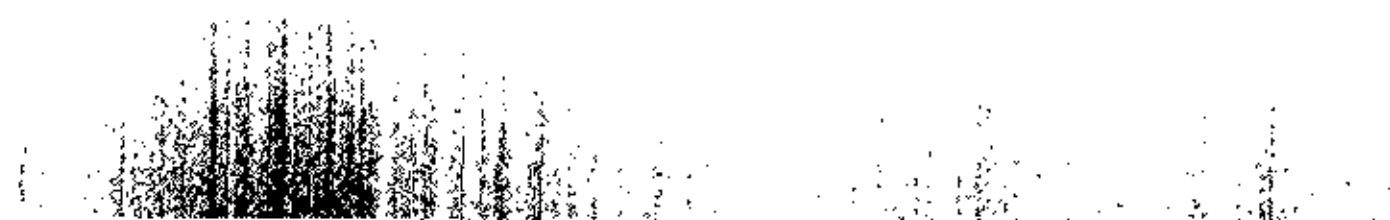
2.4 草坪蒸散和C₃、C₄代谢途径

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^[16]。大多数暖季型草坪草属于C₄植物而大多数冷季型草坪草为C₃植物。Biran^[6]的研究表明在生长速率相同时,C₃植物高羊茅的耗水量远远高于属于C₄植物的九种暖季型草坪草。温度为34.5℃时,C₃草坪草和C₄草坪草的蒸腾率很接近,但C₃草坪草的净光合效率仅为C₄草坪草的1/3。这与C₃、C₄植物的光合特性是相吻合的^[31]。

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。在满足一定草坪质量的前提下,根据草坪的实际水分需求适时适量灌溉,是实现草坪节水灌溉的核心。

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_L)和经验公式推算的潜在蒸散量(ET₀)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,草坪的灌溉时机变化较大。近年来,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

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。与其他作物不同,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^[35]。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水量。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,便可利用公式 $k = ET_a / ET_0$ (k 为作物系数; ET_a 为实测的草坪蒸散量; ET_0 为潜在蒸散量) 计算具体地区的作物系数,用于指导草坪灌溉。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^[3,9,36~40]。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^[36]。

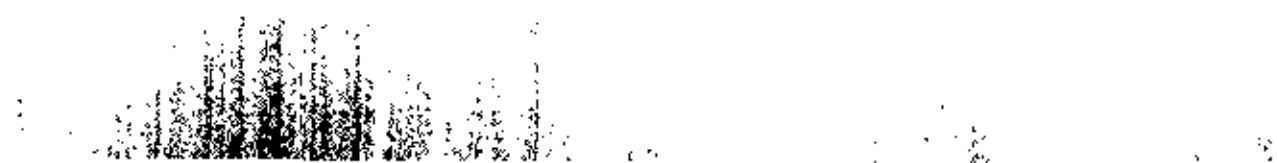
一个地区的最适灌溉量可以通过不同的方法测得。近些年来研究较多的有两种方法。一种是固定草坪的水分管理,直接测定维持在一定质量下的草坪蒸散量(ET_a)作为最适灌溉量;另一种是根据计算的潜在蒸散量(ET_0)设定不同的水分管理,观测草坪质量的变化,对耗水量和质量综合分析获得最适灌溉量。

在较早期的研究中,用于计算作物系数的 ET_a 大多是利用小型蒸渗仪在水分充足的条件下测定的^[13,18,19,22,23]。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_0 的准确性^[3,9,39]。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_a 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^[9,10,41]。

Feldhake 等^[42]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^[43]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^[36,37],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^[44]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 等^[36]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. 等^[37]发现在德克萨斯州,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_0 求得,任何影响 ET_a 和 ET_0 因素都有可能使作物系数发生变化。Devitt 等^[45]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_0 ,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_0 相差 7%~18%。Carrow^[46]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)的作物系数高于干旱、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,0.53~0.97,结缕草(Meyer)的变动最大,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 等^[43]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^[9,39]。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^[46]。

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、大气的蒸发特征和植物的水分状态来判断草坪的灌溉时机^[46]。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^[47,48],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^[49,50]。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^[49~52]。

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^[53]。Throssell 等^[50]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。发现利用这3种方法和用张力计法相比确定的灌溉次数多,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 等^[51,52]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。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^[49,51]。但这种方法以草坪植物本身为主体,比较合理的体现了草坪的水分需求状态,理论上是一种比较好的草坪灌溉时机确定方法。在实际的草坪灌溉中,还要考虑到其他因素。

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广泛的研究,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。遗憾的是,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发展的重要因素之一,而草坪蒸散的研究在我国几乎处于空白状态。开展草坪蒸散的研究,找出适合我国的草坪节水途径已迫在眉睫。

References

- [1] Burman R and Pochop L O. Evaporation, Evapotranspiration and Climatic Data. *Development in Atmospheric Science*, 22. Elsevier, 1994. 1~5.
- [2] Philip J R. Plant water relations: some physical aspects. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 1966, 17: 245~258.
- [3] Beard J B. Turfgrass: Science and Culture. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1973. 658p.
- [4] Beard J B. An assessment of water use by turfgrass. In: Gibeault V A and Cockerham S T ed. *Turfgrass water conservation*. Publ. 21405. Univ. of California, River-side, 1985. 45~60.
- [5] Tovey R, Spencer J S and Muckel D C. Turfgrass evapotranspiration. *Agron. J.*, 1969, 61: 863~867.
- [6] Biran I, Bravdo B, Bushkin-Harav I, et al. Water consumption and growth rate of 11 turfgrass as affected by mowing height, irrigation frequency, and soil moisture. *Agron. J.*, 1981, 73: 85~90.
- [7] Van Bavel C H M and Harris D G. Evapotranspiration rates from bermudagrass and corn at Raleigh, North Carolina. *Agron. J.*, 1961, 52: 319~322.

- [8] Ekern P C. Evapotranspiration by bermudagrass sod, *Cynodon dactylon* L. Per., in Hawaii. *Agron. J.*, 1966, **58**: 387~390.
- [9] Carrow R N. Drought resistance aspects of turfgrasses in the southeast; evapotranspiration and crop coefficients. *Crop. Sci.*, 1995, **35**: 1685~1690.
- [10] Kim K S and Beard J B. Comparative evapotranspiration rates and associated plant morphological characteristics. *Crop. Sci.*, 1988, **28**: 328~331.
- [11] Kopec D M, Shearman R C and Riordan T P. Evapotranspiration of tall fescue turf. *HortScience*, 1988, **23**(2): 300~301.
- [12] Aronson L J, Gold A J and Hull R J. Cool-season turfgrass responses to drought stress. *Crop Sci.*, 1987, **27**: 1261~1266.
- [13] Aronson L J, Gold A J, Hull R J, et al. Evapotranspiration of cool-season turfgrass in the humid northeast. *Agron. J.*, 1987, **79**: 901~905.
- [14] White R H, Engelke M C, Anderson S J, et al. Zoysiagrass water relations. *Crop Sci.*, 2001, **41**: 133~138.
- [15] Fernandez G C J and Love B. Comparing turfgrass cumulative evapotranspiration curves. *HortScience*, 1993, **28**(7): 732~734.
- [16] Kenna M P and Horst G L. Turfgrass water conservation and quality. In: Carrow R N, Christians N E, Shearman R C eds. *International Turfgrass Society research journal 7*. Intertec Publishing Corp., Overland Park, Kansas, 1993. 99~113.
- [17] Beard J B, Green R L and Sifers S I. Evapotranspiration and leaf extension rates of 24 well-watered, turf-type *Cynodon* genotypes. *HortScience*, 1992, **27**(9): 986~988.
- [18] Bowman D C and Macaulay L. Comparative evapotranspiration rates of tall fescue cultivars. *HortScience*, 1991, **26**(2): 122~123.
- [19] Shearman R C. Kentucky Bluegrass cultivar evapotranspiration rates. *HortScience*, 1986, **21**(3): 455~457.
- [20] Ebdon J S, Petrovic A M and Zobel R W. Stability of evapotranspiration rates in Kentucky Bluegrass cultivars across low and high evaporative environments. *Crop Sci.*, 1998, **38**: 135~142.
- [21] Shearman R C. Perennial ryegrass cultivar evapotranspiration rates. *HortScience*, 1989, **24**(5): 767~769.
- [22] Green R L, Sifers S I, Atkins C E, et al. Evapotranspiration rates of eleven Zoysia genotypes. *HortScience*, 1991, **26**(3): 264~266.
- [23] Atkins C E, Green R L, Sifers S I, et al. Evapotranspiration rates and growth characteristics of ten St. Augustinegrass genotypes. *HortScience*, 1991, **26**(12): 1488~1491.
- [24] Kneebone W R and Pepper I L. Luxury water use by bermudagrass turf. *Agron. J.*, 1984, **76**: 999~1002.
- [25] Johns D, Beard J B and Bavel C H M van. Resistance to evapotranspiration from a St. Augustinegrass turf canopy. *Agron. J.*, 1983, **75**: 419~422.
- [26] Devitt D A and Morris R L. Growth of common bermudagrass as influenced by plant growth regulators, soil type and nitrogen fertility. *J. Environ. Hort.*, 1989, **7**(1): 1~8.
- [27] Green R L, Beard J B and Casnoff D M. Leaf blade stomatal characterizations and evapotranspiration rates of 12 cool-season perennial grasses. *HortScience*, 1990, **25**(7): 760~761.
- [28] Feldhake C M, Danielson R E and Butler J D. Turfgrass evapotranspiration I. Factors influencing rate in urban environments. *Agron. J.*, 1983, **75**: 824~830.
- [29] Ebdon J S and Petrovic A M. Morphological and growth characteristics of low- and high-water use Kentucky Bluegrass cultivars. *Crop Sci.*, 1998, **38**: 143~152.
- [30] Ebdon J S, Petrovic A M and Schwager S J. Evaluation of discriminate analysis in identification of low- and high-water use Kentucky Bluegrass cultivars. *Crop Sci.*, 1998, **38**: 152~157.
- [31] Dernoeden P H and Butler J D. Relation of various plant characters to drought resistance of Kentucky bluegrass. *HortScience*, 1979, **14**: 511~512.
- [32] Casnoff D M, Green R L and Beard J B. Leaf blade stomatal densities of ten warm- season perennial grasses and

- their evapotranspiration rates. In: Takatos H ed. *Proc. 6th Intl. Turfgrass Res. Conf.*, Tokyo, July 1989, Jpn. Soc. Turfgrass Sci., 1989. 129~131.
- [33] Peacock C H and Dudeck A E. Physiological response of St. Augustinegrass to irrigation scheduling. *Agron. J.*, 1984, **76**: 275~279.
- [34] Larcher Walter, Zhai Z X, Translate. *Plant Eco-Physiology* (fifth edition). China Agricultural Uni. Press. Beijing, 1997.
- [35] Green R L, Kim K S and Beard J B. Effects of Flurprimidol, Mefluidide, and soil moisture on St. Augustinegrass evapotranspiration rate. *HortScience*, 1990, **25**(4): 439~441.
- [36] Ervin H E and Koski A J. Drought avoidance aspects and crop coefficients of kentucky bluegrass and tall fescue turfs in the semiarid west. *Crop Sci.*, 1998, **38**: 788~795.
- [37] Qian Y L and Engelke M C. Performance of five turfgrasses under linear gradient irrigation. *HortScience*, 1999, **34**(5): 893~896.
- [38] Qian Y L, Fry J D, Wiest S C, et al. Estimating turfgrass evapotranspiration using atmometers and the penman-monteith model. *Crop Sci.*, 1996, **36**: 699~704.
- [39] Devitt D A, Morris R L and Bowman D C. Evapotranspiration, crop coefficients, and leaching fractions of irrigated desert turfgrass systems. *Agron. J.*, 1992, **84**: 717~723.
- [40] Garrot D J and Mancino C F. Consumptive water use of three intensively managed bermudagrasses growing under arid conditions. *Crop Sci.*, 1994, **34**: 215~221.
- [41] Doty J A, Braunworth W S, Tan S, et al. Evapotranspiration of cool-season grass growth with minimal maintenance. *HortScience*, 1990, **25**(5): 529~531.
- [42] Feldhake C M, Danielson R E and Butler J D. Turfgrass evapotranspiration II. Responses to deficit irrigation. *Agron. J.*, 1984, **76**: 85~89.
- [43] Beach G. Irrigation of lawn, results of tests 1953~1957. *Colorado St. Exp. Stn. Gen. Series*, 1958. No. 685. 1~11.
- [44] Fernandez G C J. Repeat measure analysis of line-source sprinkler experiments. *HortScience*, 1991, **26**(4): 339~342.
- [45] Devitt D A, Kopec D, Robey M J, et al. Climatic assessment of the arid southwestern united states for use in predicting evapotranspiration of turfgrass. *Journal of Turfgrass Management*, 1995, **1**(2): 65~81.
- [46] Carrow R N. Soil/water relationships in turfgrass. In: Gibeault V A and Cockerham S T eds. *Turfgrass water conservation*. Publ. 21405, Univ. of California, Riverside, 1985. 87~102.
- [47] Augustine B J and Snyder G H. Moisture sensor controlled irrigation for maintaining bermudagrass turf. *Agron. J.*, 1984, **76**: 848~850.
- [48] O'Neil K J and Carrow R N. Kentucky bluegrass growth and water use under different soil compaction and irrigation regimes. *Agron. J.*, 1982, **74**: 933~936.
- [49] Horst G L, O'Toole J C and Faver K L. Seasonal and species variation in baseline functions for determining crop water stress indices in turfgrass. *Crop Sci.*, 1989, **29**: 1227~1232.
- [50] Throssell C S, Carrow R N and Milliken G A. Canopy temperature based irrigation scheduling indices for kentucky bluegrass turf. *Crop Sci.*, 1987, **27**: 126~131.
- [51] Jalali-Farahani H R, Slack D C, Kopec D M, et al. Evaluation of resistance for bermudagrass turf crop water stress index models. *Agron. J.*, 1994, **86**: 574~581.
- [52] Jalali-Farahani H R, Slack D C, Kopec D M, et al. Crop water stress index models for bermudagrass turf: A comparison. *Agron. J.*, 1993, **85**: 1210~1217.
- [53] Idso S B and Reginato R J. Remote-sensing of crop yields. *Science*, 1977, **196**: 19~25.

参考文献

- [34] Larcher walter, 翟志度译. 植物生态生理学, 第五版. 北京: 中国农业大学出版社, 1997.