

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.20196-0626

张桐瑞, 李富翠, 李辉, 季双旋, 范志浩, 韩烈保. 人造草垫对混合草坪景观质量、生物量及根系生长的影响. 草业科学, 2020, 37(6): 1058-1065.

ZHANG T R, LI F C, LI H, JI S X, FAN Z H, HAN L B. Effects of carpet on turf performance quality, biomass, and root growth of hybrid turf. Pratacultural Science, 2020, 37(6): 1058-1065.

## 人造草垫对混合草坪景观质量、 生物量及根系生长的影响

张桐瑞, 李富翠, 李辉, 季双旋, 范志浩, 韩烈保

(北京林业大学草坪研究所, 北京 100083)

**摘要:** 为研究人造草垫式混合草坪中人造草垫对草坪草生长的影响, 本研究以多年生黑麦草 (*Lolium perenne*) 品种‘名仕’和高羊茅 (*Festuca arundinacea*) 品种‘皇冠’为研究材料, 以无草垫处理为对照, 研究多年生黑麦草和高羊茅单播以及二者混播条件下, 人造草垫对草坪的景观质量、地上地下生物量和草坪草根系形态的影响。结果表明: 草垫处理降低了草坪的色泽等景观质量, 与无草垫对照组的色泽相比, 多年生黑麦草和高羊茅单播以及二者混播条件下草垫处理分别降低了3.8%、5.3%和3.9%。同时, 草垫处理降低了草坪草地上生物量, 多年生黑麦草和高羊茅单播条件下草垫处理较对照组分别降低了11.8%和16.9%。从垫下根系部分的根系形态参数看, 有草垫处理的根系长度、根总表面积和根系总体积均在不同程度上低于无草垫处理。因此, 人造草垫式混合草坪中, 草垫在不同程度上抑制了垫下部根系生长, 进而影响地上部分的生长。

**关键词:** 草垫式混合草坪; 景观质量; 地上生物量; 地下生物量; 根系生长

文献标志码: A 文章编号: 1001-0629(2020)06-1058-08

### Effects of carpet on turf performance quality, biomass, and root growth of hybrid turf

ZHANG Tongrui, LI Fucui, LI Hui, JI Shuangxuan, FAN Zhihao, HAN Liebao

(Turfgrass Research Institute, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Perennial ryegrass (*Lolium perenne* ‘Neruda 1 BT’) and tall fescue (*Festuca arundinacea* ‘Crown’) were used to study the effect of the carpet on turfgrass quality and root growth. Pot experiments with a no-carpet control were carried out to study the effects of carpet on turf performance quality, aboveground and underground biomass, and root morphological parameters under different seeding conditions (perennial ryegrass, tall fescue, and their mixture). The carpet significantly decreased turfgrass performance traits such as color. Turfgrass color was significantly lower than that of the control for perennial ryegrass, tall fescue, and their mixture by 3.8%, 5.3% and 3.9%, respectively. At the same time, the carpet decreased the aboveground biomass of perennial ryegrass and tall fescue by 11.8% and 16.9%, respectively. Additionally, as for the root morphological parameters of the root under the carpet, the total root length, root surface area, and root volume were all lower than those in the control to different degrees under different seeding conditions. Therefore, in artificial-natural hybrid turf, the carpet inhibited root growth under the carpet and further affected the growth of aboveground turf grass.

**Keywords:** carpet hybrid turf; turf performance quality; aboveground biomass; underground biomass; root growth

收稿日期: 2019-12-25 接受日期: 2020-03-14

基金项目: 国家自然科学基金(31971770)

第一作者: 张桐瑞(1996-), 男, 山东龙口人, 在读硕士生, 主要从事运动场草坪研究. E-mail: 783150418@qq.com

通信作者: 韩烈保(1965-), 男, 湖北钟祥人, 教授, 博士, 主要从事草坪科学与管理研究. E-mail: hanliebao@163.com

Corresponding author: HAN Liebao E-mail: hanliebao@163.com

目前, 国际市场上混合草坪的研发、生产、建植、养护已经较为成熟。作为一种新型的草坪加固技术, 混合草坪在世界范围内的顶级足球比赛中被广泛使用。混合草坪是指由天然草坪和人造草垫或草丝构成的草坪, 它结合了天然草坪与人造草坪的优点, 被广泛应用于全球顶级体育中心和专业足球俱乐部, 成为建设高质量足球场地的首选。草垫式混合草坪是混合草坪的一种, 它以天然草坪坪床为基础, 将编织型人造草垫层平整铺设在种植层上, 填充种植层材料使人造草垫上的人造草丝保持直立并播种建坪, 草坪草根系统缠绕在草垫底布上, 或穿透人造草垫底布向下生长。

国外学者对混合系统草坪的研究主要集中在坪床土壤稳定性、使用性能和运动安全等方面<sup>[1]</sup>。Graff<sup>[2]</sup>发现, 人造材料的加入对植物的生长没有显著影响; 但也有研究表明, 人造草丝增加了系统稳定性的同时, 也在一定程度上抑制了根系层的移动<sup>[3]</sup>。从可获取的文献资料来看, 现在国内有关草垫型人造天然混合草坪建植技术的研究正处于起步阶段, 仅有满达等<sup>[4-5]</sup>初步构建了混合草坪的模型, 麦靖雯等<sup>[6]</sup>研究了某种特定的人造草垫式混合草对常用几种冷季型草坪草生长的影响。关于草垫式混合草坪的研究还很薄弱。

前人的研究主要集中在混合系统的稳定性和混合草坪的运动表现方面, 对草坪草本身的研究只在密度、盖度、均一性等景观质量上有些许涉及<sup>[5-6]</sup>, 但对草坪草根系统生长的影响未见报道。而草坪草根系统的正常生长是保证草坪稳定性的前提, 研究草垫对草坪草根系统生长的影响十分必要。国内尚未成功使用过草垫式混合草坪, 但出现过由于草坪质量较差导致比赛延期的情况<sup>[7]</sup>, 我国对于人造草垫式混合系统的应用管理技术还有待加强。基于前人的研究, 本研究分析在多年生黑麦草 (*Lolium perenne*) 和高羊茅 (*Festuca arundinacea*) 单播以及二者混播条件下, 草垫式草坪对草坪景观质量和草坪草根系统生长的影响, 并以草垫为依据对草坪草根系统进行分层, 意图探究草垫对垫上、垫下草坪草根系统生长的影响, 以期草垫式人造天然混合

系统的定位提供理论依据, 为草垫式混合草坪的使用与管理提供实践经验。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试材料

高羊茅品种为‘皇冠’, 购自克劳沃(北京)生态科技有限公司, 发芽率为 82%; 多年生黑麦草品种为‘名仕’, 购自北京正道生态有限公司, 发芽率为 84%。人造草草丝纤维原材料为进口聚乙烯, 宽度  $(1.1 \pm 0.1)$  mm, 厚度  $(240 \pm 10)$   $\mu$ m, 高度 50 mm, 磅重 150 00 dtex; 织布方式采用三重围网编制方式, 底部为不可降解无弹性垫层, 有背衬, 织布密度为每平方米 52 000 针。纤维采用 W 双提的固定方式, 草丝间距 200 mm  $\times$  125 mm, 密度为每平方米 48 000 针, 经密(织布长度方向 10 cm 内沙线的排列根数) 80, 纬密(织布宽度方向 10 cm 内沙线的排列根数) 400。

### 1.2 试验设计

本研究设置播种模式分为多年生黑麦草单播、高羊茅单播以及多年生黑麦草与高羊茅混播 3 个条件, 各自播种条件下分别以无草垫作为对照, 共 6 个处理, 每个处理设置 4 个重复。分别以“PR”表示多年生黑麦草单独播种条件下试验组, “TF”表示高羊茅单独播种条件下试验组, “Mixed”表示二者混播条件下试验组, “+C”表示加草垫试验组, 6 个处理的代号分别为 PR、PR+C、TF、TF+C、Mixed 和 Mixed+C。

### 1.3 草坪建植及试验条件

试验于 2019 年 3 月-6 月进行。选籽粒饱满、大小一致的两种冷季型草坪草的种子播种于盆栽内。播种量为  $45 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 混播时高羊茅、多年生黑麦草比例为 5:4, 即高羊茅和多年生黑麦草的播种量分别为  $25$  和  $20 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。盆栽规格为底面半径 5 cm、高度 25 cm 的圆柱形管, 种植基质为河砂, 购买自建筑用砂供应商, 河砂粒径分析如表 1 所列。具体步骤: 先覆沙 18 cm, 硬化后控制容重  $1.6 \sim 1.7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 放置人造草垫, 之后一边覆沙一边梳理人造草纤维丝, 覆沙 4 cm 后播种, 植丝高度为 5 cm, 草丝

露出沙层 1 cm 左右 (图 1)。设置在室内实验室, 室内平均温度 20~25 °C, 相对湿度为 40%~50%, 每天设置光照 16 h/黑暗 8 h, 光照强度为  $110 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ , 自播种开始便进行光照处理, 直至成坪并进行测定。养护期间不进行修剪, 浇水频次为每周 5 次, 每次 200 mL, 种植期间施用氮磷钾复合肥, 产品通用名称为复混肥料(硫酸钾型), 购买自枫彩缓释肥料(江苏)有限公司, N:P:K=15:15:15, 每两周施用一次, 采用人工均匀播撒的方式, 每次施用量为  $15 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。养护 90 d 后测定。

表 1 粒径分析表  
Table 1 Particle size analysis

类型 Type	粒径 Particle size/mm	含量 Content/%
粗砾 Fine gravel	> 2.0	3.0
极粗砾 Very coarse sand	1.0~2.0	2.0
粗砂 Coarse sand	0.5~1.0	22.0
中砂 Medium sand	0.25~0.5	40.5
细沙 Fine sand	0.1~0.25	24.5
粉粒 Silt	< 0.1	8.0

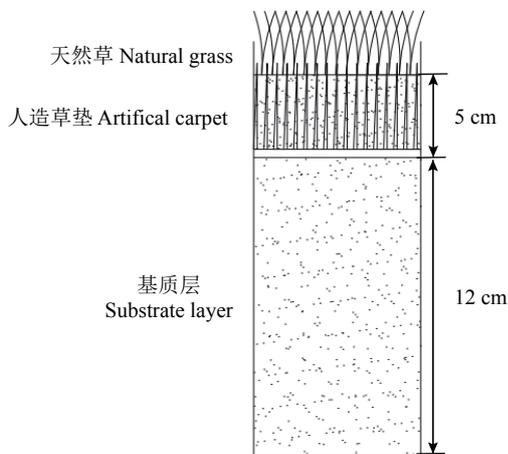


图 1 坪床剖面示意图  
Figure 1 Profile of seedbed

## 1.4 测定指标及方法

### 1.4.1 草坪景观质量的测量

草坪色泽与 NDVI 值使用 TCM500 草坪色彩分析仪 (Spectrum™) 进行测评; 密度为单位面积天然草的个体数, 采用人工计数法; 自然高度指坪床表面到草坪草最高处的垂直距离, 用直尺测量。同时采用目测法对草坪密度、颜色、质地、整齐

性进行打分<sup>[8]</sup>。

### 1.4.2 生物量测定

地上生物量和地下生物量指盆栽内所有植株的地上或地下部分干重, 采用收获法测定地上生物量<sup>[9]</sup>。地下部生物量通过洗根法获得, 洗根时用清水将沙子全部冲洗干净, 用镊子将垫子全部分解, 根系全部取出。将根系和植株地上部鲜样放置烘箱于 105 °C 杀青 30 min 后, 85 °C 烘至恒重。其中垫上部分根系深度为 5 cm, 因此垫上根系指的是地下部分 0~5 cm 的根系, 垫下根系指 5 cm 以下的根系, 无草垫对照组的根系也以此依据进行划分 (图 1)。

### 1.4.3 根系形态参数的测定

使用 Epson Scan V700 根系扫描仪对草坪草垫下根系进行扫描, 获取根系扫描图像, 并存入计算机, 之后采用根系分析系统软件 Win-RHIZO PRO 2013 (Regent Instruments Inc., Canada) 进行分析, 获得根长、根表面积、根体积。

## 1.5 数据分析

原始数据采用 Excel 2019 整理, 统计分析软件为 SPSS 20.0。显著性水平设定为  $\alpha = 0.05$ , 采用 *t* 检验对数据进行差异显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 草坪景观质量

对 3 种播种条件下草垫对草坪景观质量的分析表明 (表 2): 草垫处理降低了草坪的景观质量, 其中对草坪草色泽的影响最为明显, 在多年生黑麦草、高羊茅和二者混播的条件下有草垫试验组的色泽均显著低于无草垫对照组 ( $P < 0.05$ ), 分别降低了 3.8%、5.3% 和 3.9%。同时, 草垫处理显著降低了多年生黑麦草单播条件下的密度和株高, 分别降低了 26.6% 和 22.1%。主观评价下, 草垫处理对不同播种条件下草坪草的景观质量无显著影响 ( $P > 0.05$ )。

### 2.2 生物量

#### 2.2.1 地上、地下生物量

地上、地下生物量在 3 种播种条件下有草垫组的地上生物量均低于无草垫组, 且在两个单播条件下差异显著 ( $P < 0.05$ ) (图 2), 多年生黑麦草和高

表 2 草垫对不同播种条件下草坪景观质量的影响  
Table 2 Effect of carpet on turf performance quality under different seeding conditions

处理 Treatment	色泽 Color	密度 Density/(shoot·cm <sup>-2</sup> )	株高 Plant height/cm	景观质量打分 Performance quality
PR+C	6.31 ± 0.04	3.06 ± 0.17	21.63 ± 0.17	6.50 ± 0.29
PR	6.56 ± 0.06*	4.17 ± 0.40*	27.75 ± 0.63*	6.75 ± 0.25
TF+C	6.30 ± 0.03	2.51 ± 0.10	29.83 ± 0.10	6.13 ± 0.43
TF	6.65 ± 0.11*	2.37 ± 0.19	25.73 ± 0.19	6.25 ± 0.85
Mixed+C	6.37 ± 0.06	2.58 ± 0.37	22.25 ± 0.04	6.75 ± 0.25
Mixed	6.63 ± 0.11*	2.78 ± 0.12	25.63 ± 0.12	7.00 ± 0.41

\* 表示同一播种条件下有草垫和无草垫处理间差异显著( $P < 0.05$ )；PR：多年生黑麦草单播；TF：高羊茅单播；Mixed：多年生黑麦草与高羊茅混播；+C：加人工草垫；图2、图3、图4、图5同。

\* indicate significant difference between two carpet treatments under the same sowing mode at the 0.05 level; PR: perennial ryegrass monoculture; TF: tall fescue monoculture; Mixed: perennial ryegrass and tall fescue mixture; +C: with artificial woven; this is applicable for Figure 2, Figure 3, Figure 4 and Figure 5 as well.

羊茅单播条件下较无草垫处理分别降低了 11.8% 和 16.9%。同时，有无草垫处理对 3 个播种条件下的地下生物量均无显著影响 ( $P > 0.05$ )。

### 2.2.2 根冠比

从各处理之间的根冠比来看 (图 3)，在 3 个播种条件下，有草垫试验组的根冠比均大于无草垫

对照组，且在多年生黑麦草单播和二者混播条件下差异显著 ( $P < 0.05$ )，较无草垫对照组分别高出 23.5% 和 23.2%。

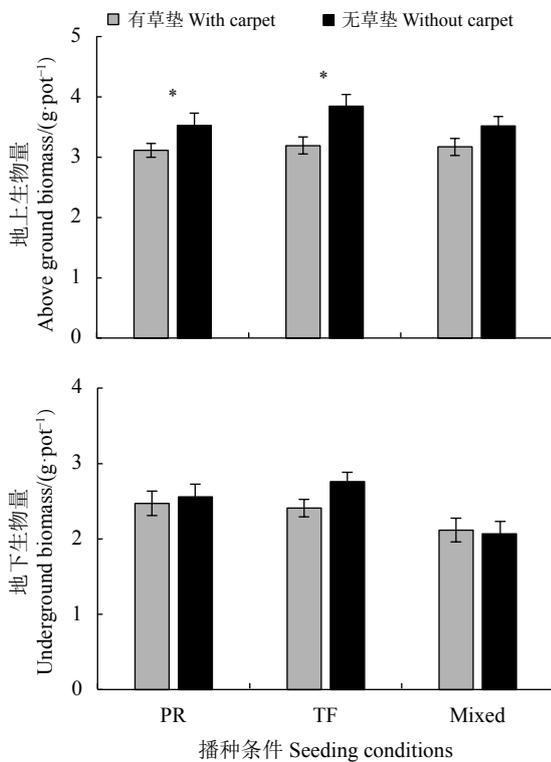


图 2 草垫对不同播种条件下草坪草地上、地下生物量的影响

Figure 2 Effect of carpet on aboveground and underground biomass under different seeding conditions

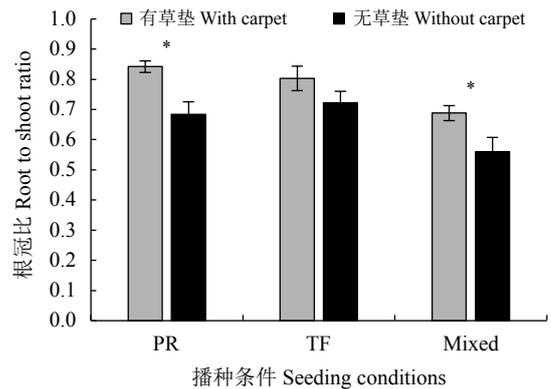


图 3 草垫对不同播种条件下草坪草根冠比的影响  
Figure 3 Effect of carpet on root-shoot ratios under different seeding conditions

### 2.2.3 垫上、垫下根系生物量及其比值

在 3 种播种条件下，有草垫组和无草垫组的垫上、垫下根系生物量均无显著差异 ( $P > 0.05$ ) (图 4)。多年生黑麦草在有草垫和无草垫处理中垫下/垫上根系生物量的比值分别为 0.23 和 0.35，高羊茅单播条件下分别为 0.36 和 0.39，二者混播条件下分别为 0.42 和 0.35。3 个播种条件下有草垫与无草垫组间均无显著差异。

### 2.3 根系形态参数指标

在两种草坪草单播条件下，根系总根长、根系总表面积和总根体积均呈现出有草垫组低于无草

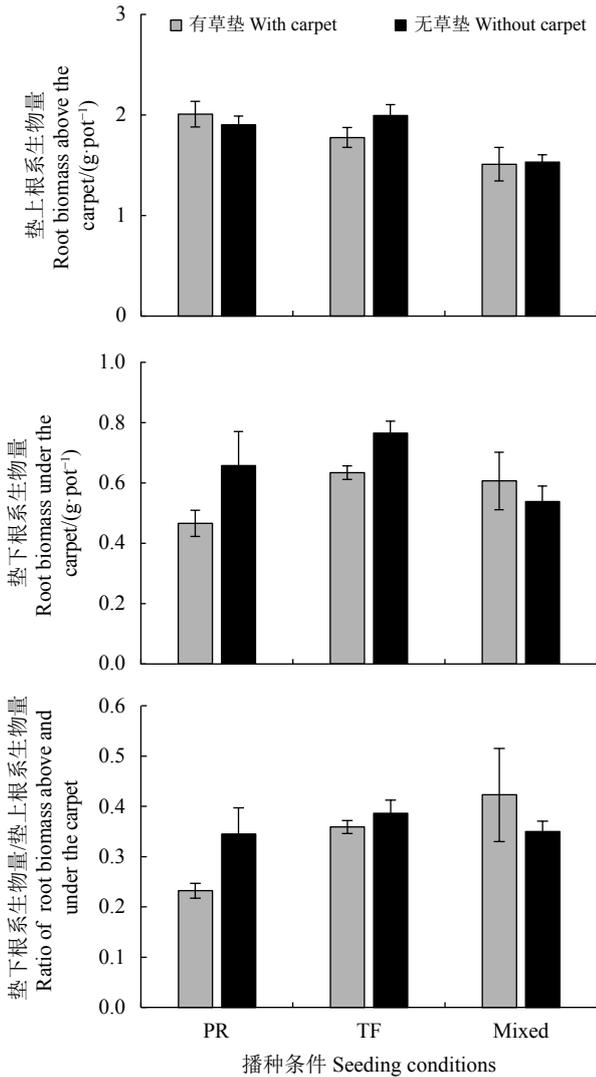


图 4 草垫对不同播种条件下草坪草垫上、垫下生物量及其比值的影响

Figure 4 Effect of carpet on biomass and ratio of root under and above the carpet under different seeding conditions

垫组的趋势，其中在两个单播条件下，有草垫组比无草垫组的根系总长度分别降低了 22.6% 和 12.1%，且在多年生黑麦草单播条件下差异显著 ( $P < 0.05$ ) (图 5)。同时在两个单播条件下，有草垫组根系总表面积分别比无草垫组降低了 16.7% 和 19.4%，且在高羊茅单播条件下差异显著 ( $P < 0.05$ )。在混播条件下，草垫处理对草坪草根系形态参数没有产生显著影响。

### 3 讨论

#### 3.1 草坪综合表现

本研究从色泽、密度、自然高度等方面对草坪

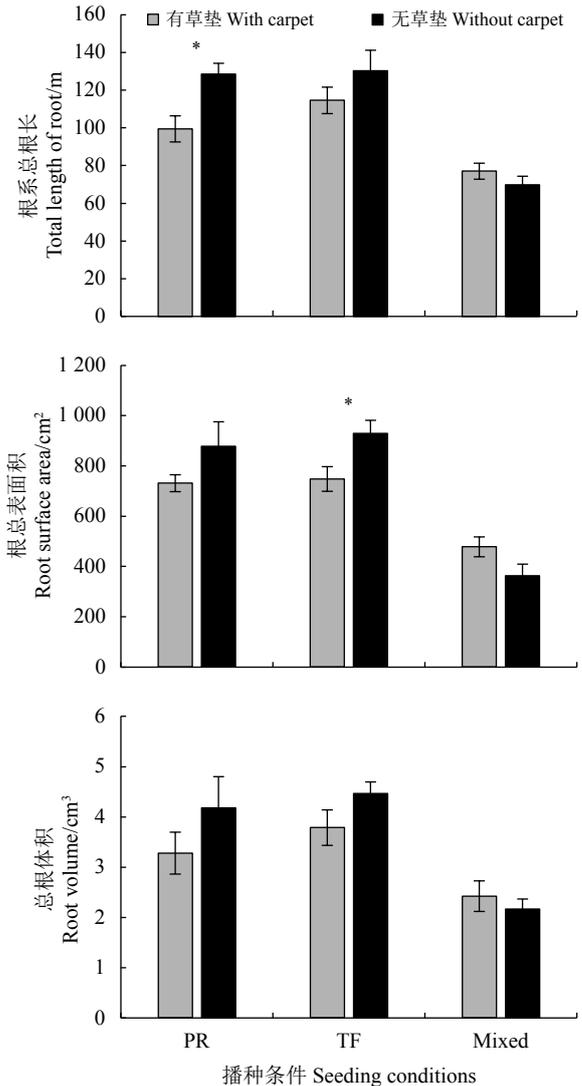


图 5 草垫对不同播种条件下草坪草垫下根系形态参数的影响

Figure 5 Effect of carpet on root morphological parameters under the carpet under different seeding conditions

的综合表现进行评价，并对景观质量进行整体打分。其中，草坪色泽是草坪植物反射光后对人眼的颜色感觉，可直接反映草坪植物的生长状况。而草坪密度反映的是单位面积草坪草的个体数，可以衡量草坪草数量大小的指标。草坪的景观质量是衡量草坪质地、密度、颜色、高度等方面的一个综合指标<sup>[10]</sup>。分析草坪景观质量的各项指标发现，草垫对草坪草景观质量的影响主要为抑制作用，其中对草坪草色泽的影响最为明显，在 3 种播种条件下有草垫组的色泽均显著低于无草垫组的 (表 2)。已有研究表明，人造天然混合草的色泽低于无草垫对照组，人造草丝行距为 2 cm × 2 cm 和

2 cm × 4 cm 时的草坪密度也低于对照组, 均一性差异不大<sup>[5]</sup>; 混合系统中草坪草的盖度、密度均低于无草垫组<sup>[11]</sup>, 本研究得出相似结论。原因可能是草垫的存在阻碍了根系的正常生长, 草坪草吸取水分和养分的能力降低, 进而影响了地上部分的生长。

### 3.2 生物量

地上生物量可直接反映草坪草地上部分的生长情况。本研究表明, 在两种单播条件下均表现出有草垫组地上生物量显著低于无草垫组(图1)。武鑫等<sup>[11]</sup>对比了不同规格的混合系统草坪和天然草发现, 各个规格混合系统的地上生物量均低于对照组, 本研究也得到了类似结论, 究其原因可能是草垫对草坪草地上部分的生长起到了抑制作用。

通过对比各播种条件下的地下生物量发现, 各处理之间差异不明显(图1)。同时, 以草垫所在深度为依据将根系分为垫上根系和垫下根系, 为了研究草垫对草坪草根系向下扩展作用的影响, 拟定了垫下根系生物量和垫上根系生物量的比值, 以此衡量草垫对根系的阻碍作用, 该比值越高, 说明穿过草垫的根系越多, 比值低则说明穿过草垫的根系少, 草垫对草坪草根系的阻碍作用越明显。本研究分析表明, 该比值在各播种条件下的处理之间无显著差异。草垫对草坪草垫上和垫下根系生物量没有产生显著影响(图3)。满达<sup>[5]</sup>的研究也表明, 在泥炭 0、原土 100% 和泥炭 15%、原土 85% 处理下, 混合草坪和对照组的地下生物量之间均无显著差异。

根冠比是体现植物地上部与地下部相关性的重要指标<sup>[12]</sup>。增大根冠比是植物适应胁迫的重要策略, 植物通过增加根冠比提高植物对水分与养分的吸收利用<sup>[13]</sup>。本研究表明, 草垫对草坪草的根冠比有促进作用(图2), 主要是通过减少地上生物量来实现的。草垫的存在对草坪草的生长产生了抑制作用, 植物通过减少根冠比的策略减少水分和养分的输出, 维持草坪草的生长。

### 3.3 根系形态

草坪草根系的生长是保证草坪稳定性的前提, 草坪稳定性是草坪根系生长情况与其和坪床结合情况的反映。草坪根系的形态和分布会影响地上

部的生长<sup>[14]</sup>。根系生长要克服坪床的机械阻力, 随着根系层深度的增加土壤的紧实度逐渐增加, 使根不易向深层扩展<sup>[15]</sup>。本研究采用根系地下生物量、根系总长度、根总表面积、根系总体积等指标显示草坪草垫下根系的生长情况。根长度、表面积、体积等根系形态参数是反映植物根系生长状况的重要指标。根系长度是表明根系吸收功能的重要参数, 而根系表面积与根系吸收水分和营养的能力最为密切, 根系的表面积越大, 根系吸收水分和养分的能力越强, 根系生根能力增强, 从而能有效提高根系固土效果。根体积是衡量根系空间分布的重要参数, 能反映植物生长状况, 从而得出植物根系对土壤的加固效果<sup>[16]</sup>。草垫上的根系与草垫相互缠绕成一个整体, 有利于加强混合系统的稳定性, 而垫下根系向下扩展延伸, 为植物生长提供必要的养分和水分, 为探究草垫对根系向下伸长的影响, 对草垫下根系进行扫描, 通过分析垫下部分的根系形态参数指标发现, 两种单播条件下的各项指标均低于对照组(图4), 说明草垫会抑制草坪草垫下部分的根系长度、表面积和体积。草垫作为一种阻碍, 抑制了根系的伸展和延伸, 草坪草的根系只能透过草垫产品的缝隙扎入坪床吸取水分和养分, 草垫通过影响草坪根的能力和吸收水分的效益, 从而抑制其地上部分的生长。

坪床是草坪草的立地条件, 其质量高低与坪床结构以及坪床建造材料密切相关<sup>[17-19]</sup>。与天然草坪和人造草坪相比, 混合草坪牵引力更高, 具有更高的坪床稳定性。Baker 和 Richards<sup>[20]</sup>的研究发现, 坪床纤维含量越高, 表面硬度和牵引力也会上升, 草坪场地也越稳定。在混合系统中, 植物根系与草垫缠绕在一起, 而本研究将混合系统中草坪草的根系单独进行研究, 意在探讨草垫产品对植物本身的影响, 不能用来衡量该系统的稳定性。坪床的稳定性不能仅通过根系指标来衡量, 需把坪床作为整体进行测定, 因此草垫对坪床稳定性的影响还需进一步探讨。

人造草垫的使用为混合草坪的养护与管理提出了新的要求, 传统的养护技术手段不能同样适用。例如, 打孔在传统球场管理中是一项重要的

养护管理措施,可以改善土壤板结,增强根系的有氧呼吸,加快枯草层分解,从而促进草坪地上和地下部分生长发育<sup>[21]</sup>。而在草垫式人造天然混合系统中,打孔会破坏草垫的结构,从而影响其使用寿命。本研究仅分析草垫对混合系统中天然草生长的影响,而没有涉及草垫对混合系统的稳定性及运动指标方面的影响,在今后的研究中需要完善。场地安全与质量已成为建设与管理运动场草坪的首要任务,草垫式人造天然混合草坪的使用要求、管理手段、以及系统本身的利弊还需进

一步探索。

#### 4 结论

人造草垫降低了草坪的色泽等景观质量;草垫在不同程度上抑制了垫下部分根系的根系长度、表面积和体积,进而影响地上部分的生长。人造草垫对草坪草的生长具有抑制作用,主要体现在地上部分和垫下根系部分。草垫处理通过减少地上生物量增加了草坪草的根冠比,关于混合系统的稳定性研究还需进一步展开。

#### 参考文献 References:

- [1] LULLI F, VOLTERRANI M, MAGNI S, ARMEN R. An innovative hybrid natural-artificial sports pitch construction system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part P Journal of Sports Engineering and Technology*, 2011, 225(3): 171-175.
- [2] XtraGrass Hybrid Turf System. XtraGrass hybrid system feels like and plays like natural grass. (2015-11-30) [2019-08-22] <https://www.xtragrass-hybrid-turf.com/>.
- [3] ANDREWS C. Hybrid football pitches: Why the grass is always greener. (2016-10-11) [2019-08-22] <https://eandt.theiet.org/content/articles/2016/10/hybrid-football-pitches-why-the-grass-is-always-greener/>.
- [4] 满达,包永霞,宋桂龙,韩烈保.运动场草坪的坪床加固技术研究进展. *草业科学*, 2010, 27(7): 41-47.  
MAN D, BAO Y X, SONG G L, HAN L B. Research progress on strengthening technology for turf bed in the sports field. *Pratacultural Science*, 2010, 27(7): 41-47.
- [5] 满达.天然草与人工草混合系统草坪特性研究.北京:北京林业大学博士学位论文,2011.  
MAN D. Researches on The characteristics of natural-artificial turf. PhD Thesis. Beijing: Beijing Forestry University, 2011.
- [6] 麦靖雯,武鑫,徐彦花,张巨明.3种冷季型草坪草建植的混合草坪比较与评价. *广东农业科学*, 2019, 46(7): 46-52.  
MAI J W, WU X, XU Y H, ZHANG J M. Comparison and evaluation of natural-synthetic hybrid sports system with three types of cold season turfgrass. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2019, 46(7): 46-52.
- [7] 金雨蒙.中超比赛因武汉五环体育中心草坪质量问题延期. (2019-04-07)[2019-12-20] <http://hb.people.com.cn/n2/2019/0407/c192237-32817023.html>.  
JIN Y M. China Super Games delayed because of the turf quality of Wuhan Five Rings Sports Center. (2019-04-07)[2019-12-20] <http://hb.people.com.cn/n2/2019/0407/c192237-32817023.html>.
- [8] ROBERT D E. 草坪科学与管理.冯钟粒,张守先(译).北京:中国林业出版社,1992.  
ROBERT D E. Turf Science and Management. FENG Z L, ZHANG S X (tran.). Beijing: China Forestry Press, 1992.
- [9] 黄德青,于兰,张耀生,赵新全.祁连山北坡天然草地地上生物量及其与土壤水分关系的比较研究. *草业学报*, 2011, 20(3): 20-27.  
HUANG D Q, YU L, ZHANG Y S, ZHAO X Q. Above-ground biomass and its relationship to soil moisture of natural grassland in the northern slopes of the Qilian Mountains. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 20(3): 20-27.
- [10] 罗耀,张巨明,叶振华,时佩,陆璃,龚广.广州亚运会运动场草坪建植质量调查与分析. *草原与草坪*, 2012, 32(4): 28-34.  
LUO Y, ZHANG J M, YE Z H, SHI P, LU L, GONG G. Investigation and evaluation on the quality of sports turf of Guangzhou Asian Games. *Grassland and Turf*, 2012, 32(4): 28-34.
- [11] 武鑫.天然草与人工草混合运动场草坪系统研究.广州:华南农业大学硕士学位论文,2017.

- WU X. Study on natural-synthetic hybrid sports turf system. Master Thesis. Guangzhou: South China Agricultural University, 2017.
- [12] 徐洪雨, 王英宇, 宋桂龙, 韩烈保. 华北土石山区公路边坡常见植物根系地下分布特征. *中国水土保持科学*, 2013, 11(2): 51-58.  
XU H Y, WANG Y Y, SONG G L, HAN L B. Characteristics of root system distribution of common plants on freeway slopes in earthy-rocky mountain area of North China. *Science of Soil and Water Conservation*, 2013, 11(2): 51-58.
- [13] 杨振亚, 周本智, 陈庆标, 葛晓改, 王小明, 曹永慧, 童冉, 石洋. 干旱对杉木幼苗根系构型及非结构性碳水化合物化合物的影响. *生态学报*, 2018, 38(18): 6729-6740.  
YANG Z Y, ZHOU B Z, CHEN Q B, GE X G, WANG X M, CAO Y H, TONG R, SHI Y. Effects of drought on root architecture and non-structural carbohydrate of *Cunninghamia lanceolata*. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(18): 6729-6740.
- [14] HEJDUK S, HRABE F. Influence of different systems of grazing: Type of swards and fertilizing on underground phytomass of pastures. *Plant Soil and Environment*, 2010, 49: 18-23.
- [15] 李丹丹, 宗俊勤, 郭海林, 陈静波, 张有海, 周震东, 刘建秀. 不同坪床配比对‘阳江’狗牙根草坪耐践踏性的影响. *草业学报*, 2019, 28(8): 72-83.  
LI D D, ZONG J Q, GUO H L, CHEN J B, ZHANG Y H, ZHOU Z D, LIU J X. Effect of different turf-bed soil ratios on the traffic resistance of ‘Yangjiang’ bermudagrass sports turf. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(8): 72-83.
- [16] 嵇晓雷. 基于植被根系分布形态的生态边坡稳定性研究. 南京: 南京林业大学博士学位论文, 2013.  
JI X L. A roots distribution-based study on the stability of ecological slope. PhD Thesis. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2013.
- [17] BEARD J B. Turfgrass Science and Culture. New Jersey: Prentice Hall, 1973: 325-361.
- [18] BEARD J B. Turf Management for Golf Course. New York: Macmillan Publishing Company, 1982: 95-119.
- [19] 宋桂龙, 韩烈保. 足球场草坪运动质量影响因素的研究进展. *中国草地*, 2003, 25(1): 54-62.  
SONG G L, HAN L B. Research progress of effect factors on the playing quality of soccer pitches. *Grassland of China*, 2003, 25(1): 54-62.
- [20] BAKER S W, RICHARDS C W. The effect of fiber reinforcement on the quality of sand rootzones used for winter games pitches. *Veterinarska Stanica*, 1994, 106(6): 107-118.
- [21] 张鹏飞. 不同梳草和打孔强度对暖季型高尔夫果岭草坪的影响. 南昌: 江西农业大学硕士论文, 2016.  
ZHANG P F. Effects of different intensity of the comb grass and punch on the warm-season green turf. Master Thesis. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2016.

(责任编辑 武艳培)