

渭北果园生草生物量与土壤养分因子的关系

方凯凯, 张玉岱, 李 树, 王志康, 杜毅飞, 李会科

(西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 果园生草技术作为一种先进的果园管理模式, 能够改善土壤的理化性状。采用 Person 相关性和通径分析方法, 对苹果园清耕、苹果/白三叶(*Trifoliurn repens* L.)、苹果/红三叶(*Trifolium pretense*)、苹果/小冠花(*Coronilla varia* L.)、苹果/鸡脚草(*Dactylis glomerata* L.)、苹果/百脉根(*Lotuscorniculatus*) 间作 6 种管理模式下生草生物量和土壤养分因子进行了研究, 探讨了生草生物量与土壤养分因子的关系, 以期为果园生草的合理选择与有效管理提供参考。结果表明: 5 种生草的总生物量都介于 150 ~ 300 g·m⁻², 小冠花的总生物量最大, 而白三叶最小, 具体顺序为: 小冠花 > 百脉根 > 鸡脚草 > 红三叶 > 白三叶。通径分析结果表明, 土壤肥力因子对生草生物量的直接作用系数大小顺序为容重 > 全氮 > 速效钾 > 有机碳 > 硝态氮 > 铵态氮 > 速效磷, 土壤容重和全氮的直接和间接通径系数较大(分别为 0.847 和 0.917), 是影响生草生物量最主要的因素, 速效钾和有机碳是影响生草生物量的次要因子, 而硝态氮、铵态氮和速效磷对生草生物量的作用很微弱。

关键词: 果园生草; 养分因子; 生草生物量; 通径分析

中图分类号: S158; S155.4 + 7 **文献标志码:** A

Relationship between orchard herbage biomass and soil nutrient factors in Weibei

FANG Kai-kai, ZHANG Yu-dai, LI Shu, WANG Zhi-kang, DU Yi-fei, LI Hui-ke

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Interplanting herbage in orchard, an advanced orchard management mode, plays a significant role in improving orchard soil conditions. By using the methods of Person correlation and path analysis, this paper studied herbage biomass and soil nutrient factors under six species of management mode in apple orchards, including clear tillage mode, *Trifoliurn repens* L. mode, *Trifolium pretense* mode, *Coronilla varia* L. mode, *Dactylis glomerata* L. mode and *Lotus-corniculatus* mode. The relationship between herbage biomass and soil nutrient factors was thereby explored, providing a reference for the rational choice of orchard herbage planting and its effective management. The results showed that total biomass by five herbages was each between 150 ~ 300 g·m⁻². *Coronilla varia* L. had the maximal total biomass. However, *Trifolium repens* L. resulted in the minimum. The order for biomass from high to low by different modes was *Coronilla varia* L. > *Lotuscorniculatus* > *Dactylis glomerata* L. > *Trifolium pretense* > *Trifolium repens* L. From the path analysis, the sequence of soil properties based on their direct effect on herbage biomass was: Bulk density > Total N > Available K > Organic carbon > Nitrate nitrogen > Ammonium nitrogen > Available P, meaning that direct (0.847 and 0.917, respectively) and indirect path coefficient of soil bulk density and total nitrogen were both the highest. These were the most important factors that affect herbage biomass. Available potassium and organic carbon were the secondly important factors that influence the herbage biomass, whereas nitrate nitrogen, ammonium nitrogen and available phosphorus had weak effects on herbage biomass.

Keywords: orchard herbage; nutrient factors; herbage biomass; path analysis

果园生草栽培是从 20 世纪 40 年代兴起, 欧美 及日本等果树生产发达国家普遍推行的果园可持续

收稿日期: 2015-09-01
基金项目: 国家自然科学基金(31570623); “十二五”国家科技支撑计划(2014BAD16B06); 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-28); 公益性行业专项子专题(农业)(K312021109); 陕西省科技统筹创新(2016KTCQ02-24)
作者简介: 方凯凯(1991—), 男, 浙江衢州人, 硕士, 研究方向为农业生态环境。E-mail: fangkaikai@nwsuaf.edu.cn。
通信作者: 李会科(1965—), 男, 陕西武功人, 副教授, 博士生导师, 主要从事农果复合型生态农业方面的研究。E-mail: lihuike@nwsuaf.edu.cn。

发展土壤管理模式。中国则于1998年将果园生草制作为绿色果品生产主要技术措施在全国推广^[1-2]。近年来我国开展了不少果园生草方面研究^[3-6],生草已被证实具有改善果园生态环境^[7-8]、增加生物多样性、改善土壤理化性状^[9]、防止水土流失^[3,10]、促进果树生长、改善果实品质^[11]等优点。此外,草地生态系统还是全球陆地生态系统的重要组成部分,在全球碳循环和气候调节中起着重要作用,天然草地的净初级生产力(NPP)约占总陆地植被生产力的20%,也是土壤有机碳库最主要的输入来源之一^[12]。

黄土高原是中国苹果两大优生区之一,以渭北为代表的黄土高原苹果产业已成为促进区域经济发展,解决“三农”问题,改善生态环境的支柱产业^[2,9]。近些年来生草栽培已成为渭北黄土高原建设现代果业的重要内容之一,通过生草栽培以改善果园土壤理化性状,提高土壤蓄持和供应水肥的能力对当地苹果生产至关重要。然而,在果园生草复合系统中,牧草组分对果园土壤的影响随草种不同而有所差异,牧草组分生物量与果园土壤之间存在着相互的反馈作用。因此,测定不同生草草种生物量,阐明其与土壤肥力因子的关系对果园生草复合系统的管理和合理利用,促进果园生草复合系统高效持续发展,实现果园经济与生态效益的同步提高具有重要意义^[13]。

当前,有关果园生草生物量的相关研究还不多见,且现有关于生草的研究多集中在微生物与酶的分布及种类^[14-22]、土壤性质改善^[23-26]、面源污染控制^[27-29]、果园气候调节^[2,30]等的探讨上,而针对果园生草生物量与土壤养分因子关系的研究还鲜见报道。鉴于此,本研究通过相关分析和通径分析方法比较5种果园生草草种的地上、地下生物量并结合土壤养分因子,揭示不同生草生物量与土壤养分因子的关系,旨在为渭北果园生草生物量的研究提供基础数据,为果园生草的合理选择与科学管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于渭北黄土高原苹果优势产区白水縣(地处东经109°16′~109°45′,北纬35°4′~35°27′),为西北农林科技大学苹果试验站。其气候类型属于暖温带大陆性季风气候,平均海拔约为850 m,土壤为黄绵土,土层深厚,剖面质地均匀。年平均气温

11.4℃,多年平均降水量577.8 mm,降水时空分布不均且变化较大。光照充足,光热资源丰富,无霜期约207 d。苹果品种为13 a生乔化红富士(富士/新疆野苹果 *Malus demestica Borkh*),种植密度3 m×8 m。

1.2 试验设计

本研究选用5个牧草品种作为试验草种,与清耕(clear tillage)进行对照。共6个处理,每个处理3次重复,共18个小区,每个小区30 m²,随机区组排列。供试草种分别为白三叶(*Trifolium repens* L.)、红三叶(*Trifolium pretense*)、小冠花(*Coronilla varia* L.)、鸡脚草(*Dactylis glomerata* L.)、百脉根(*Lotus corniculatus*),试验布设于2006年3月,行间生草,已栽培7年。播前深翻整地,开沟条播,播种密度为0.75 g·m⁻²,每年刈割2~3次,覆盖于苹果树行间,采用软管微喷的方式节水灌溉,试验期间对各生草草种不施肥,各处理区的果树田间管理措施保持一致。

1.3 试验方法

1.3.1 样品采集 2011年秋季,在各实验区随机布设5个采样点,每个采样点随机选取3个样方(1 m×1 m)。用剪刀除去地上生物量并清除枯枝落叶层,人为挖取长、宽、深分别为80、60 cm和80 cm的土壤剖面,采集4个不同土层类型的土样,同时用环刀(100 cm³)测定土壤容重。同一采样点同一层次土壤混匀作为一个样品,共120个样品。样品中去除杂物,于室内经过阴干,研磨过2 mm筛,装袋贮存备用^[31]。

1.3.2 测定方法 土壤有机碳(SOC)采用浓硫酸-重铬酸钾外加热法测定^[32]。用土钻(直径90 mm)对根系进行分层采样(0~10、10~20、20~40、40~60 cm),每个生草区3次重复。牧草根系的分级方法按细根≤1 mm、粗根>1 mm进行,然后将分级后的根放置于45℃烘箱中9~11 h,最后用分析天平称重,即可得到根干重。根系生物量用根干重密度来表示,由公式 $RWD = M/V$ 计算得出。式中, RWD 为根干重密度(mg·cm⁻³), M 为根系干重(g), V 为土体体积(cm³)。地上部分生物量为每平方米样方的烘干后生物量,单位为g·m⁻²^[33]。

土壤容重采用环刀法测定,以g·cm⁻³表示;全氮含量的测定采用凯氏定氮法^[34];硝态氮和铵态氮用0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂浸提,采用美国BRAN+LUEBBE公司生产的AA3流动分析仪测定;速效磷含量的测定采用碳酸氢钠法;速效钾含量的测定采用火焰光度法^[35]。

表 1 样地生草对土壤肥力的影响
Table 1 Effects of the herbage on soil fertility

生草种类 Grass species	全氮 Total N /(g·kg ⁻¹)	容重 Bulk density /(g·cm ⁻³)	速效钾 Available K /(mg·kg ⁻¹)	有机碳 Organic carbon /(g·kg ⁻¹)	硝态氮 Nitrate nitrogen /(mg·kg ⁻¹)	铵态氮 Ammonium nitrogen /(mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available P /(mg·kg ⁻¹)
白三叶 <i>Trifolium repens</i> L.	0.540	1.595	150.473	10.050	52.800	0.525	6.710
红三叶 <i>Trifolium pretense</i>	0.615	1.580	156.328	10.580	55.560	0.550	5.875
小冠花 <i>Coronilla varia</i> L.	0.515	1.625	179.058	9.178	62.813	1.065	5.135
鸡脚草 <i>Dactylis glomerata</i> L.	0.525	1.515	199.585	10.598	53.673	0.620	7.193
百脉根 <i>Lotus corniculatus</i>	0.483	1.638	143.545	8.390	50.193	0.820	4.483
清耕 CK	0.405	1.658	134.478	6.948	28.830	0.453	4.098

1.4 数据处理

采用 Excel 软件作图表,数据的相关分析采用 SPSS 18.0 统计软件进行处理,用单因素方差分析 (One – way ANOVA) 进行不同生草生物量和土壤理化指标的差异性分析,对数据进行标准化后,建立生物量与养分因子的多元线性回归方程并完成显著性检验,在显著性检验成功的基础上运用通径分析方法^[36]计算理化因子对生草生物量的直接和间接通径系数。

2 结果与分析

2.1 不同生草草种的生物量特征

由图 1 可知:根系生物量的垂直分布在各层比

例不同,但其分布格局特征相似。随着土层深度的不断加大,从 0 ~ 10 cm 到 40 ~ 60 cm,5 种生草的地下生物量均呈现明显下降的变化特征。在土壤浅层 0 ~ 10 cm,生草的地下生物量较高,为 2 ~ 9 g·m⁻²;而在深层,白三叶和红三叶的根系生物量为 0,其它生草的生物量也较低。总体来看,小冠花、鸡脚草和百脉根的地下生物量高于白三叶和红三叶。

生草粗根(直径 $D > 1\text{ mm}$)对地下生物量的贡献明显高于细根(直径 $D < 1\text{ mm}$)。粗根和细根都呈现一个共同的规律:土壤浅层根的生物量高于深层,小冠花、鸡脚草和百脉根的变化尤为显著,土层 0 ~ 20 cm 是生草根系的主要生长区,这与生草根系的生长特征相关。

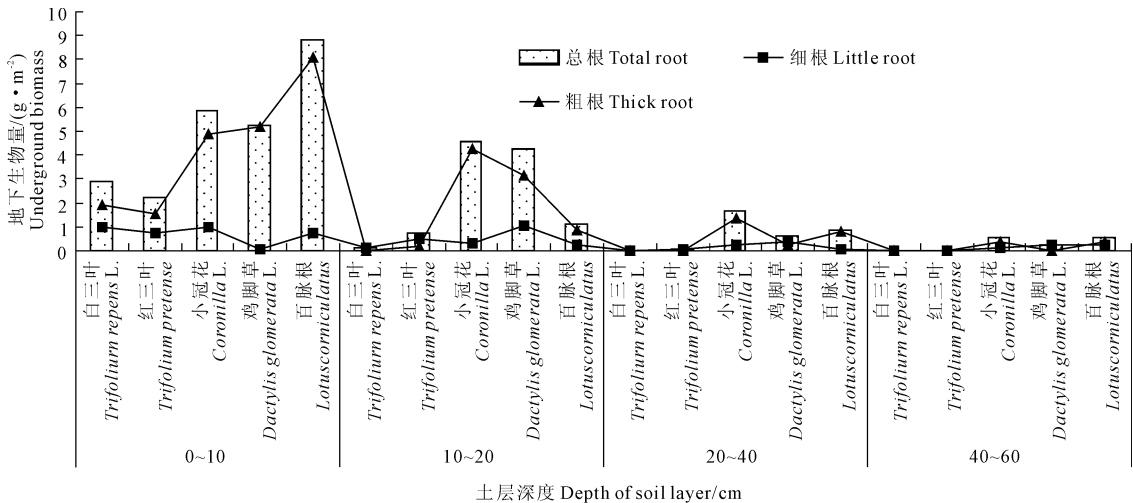


图 1 不同土层深度的生草地下生物量

Fig. 1 Biomass of underground herbage at different soil depths

图 2 表明:5 种生草在不同土层根重的分布呈现一定的差异性。在 0 ~ 10 cm 土层范围内,鸡脚草根重明显占优势,而红三叶根重最小,根重大小顺序为:鸡脚草 > 小冠花 > 百脉根 > 白三叶 > 红三叶。在 10 ~ 20 cm 土层范围内,根重表现为:小冠花 ≈ 百脉根,在 20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm 土层范围内,只有

小冠花、鸡脚草和百脉根有少量根系分布,白三叶和红三叶则几乎无根系。

由图 3 可看出:5 种生草地上生物量存在一定的差异,小冠花的生物量明显高于其它 4 种生草,其大小顺序表现为小冠花 > 百脉根 ≈ 鸡脚草 > 红三叶 ≈ 白三叶。地上生物量的平均值分布在 150 ~ 300 g

·m⁻²范围内。

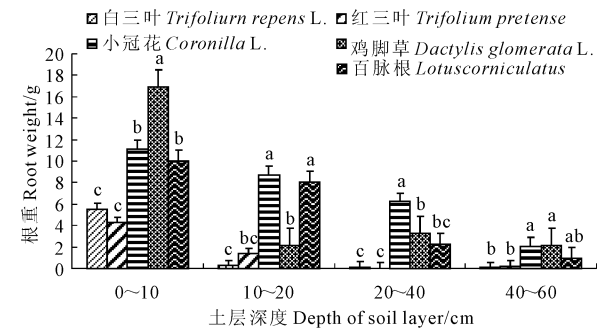


图 2 不同生草的根重

Fig.2 The weights of different herbage roots

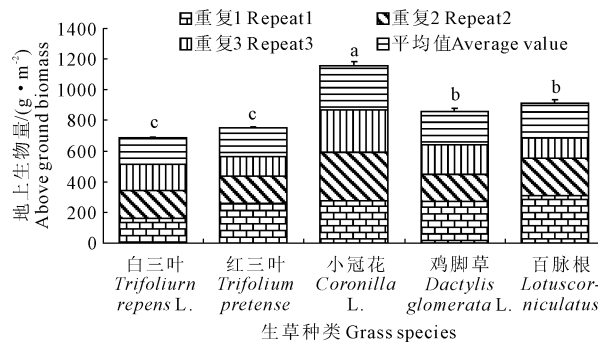


图 3 生草的地上生物量平均值

Fig.3 The aboveground biomass of herbage

5 种生草的总生物量介于 150 ~ 300 g·m⁻²,小冠花的总生物量最大,而白三叶最小,具体顺序为:小冠花 > 百脉根 > 鸡脚草 > 红三叶 > 白三叶(图 4)。

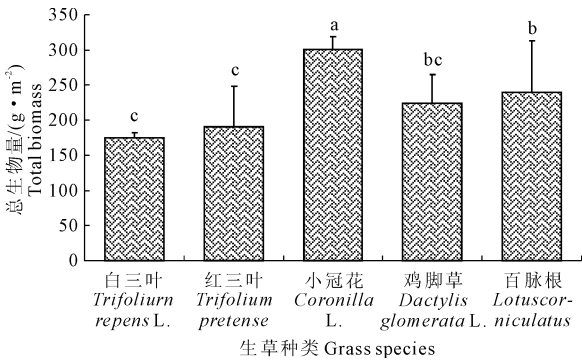


图 4 不同生草草种的总生物量

Fig.4 The total biomass of different herbage

注:柱上所标字母相同表示处理间无显著差异($P > 0.05$)

Note: Column on the same standard letter showed no significant difference among treatments.

2.2 生草生物量之间及其与土壤养分含量的相关分析

2.2.1 生草生物量之间的关系 不同生草草种生物量之间在一定线性相关关系,白三叶与红三叶、红三叶与百脉根之间存在显著性相关关系,相关系数分别为 0.734 和 0.794;白三叶与鸡脚草及百脉根、鸡脚草与百脉根之间存在一定的相关关系,相关系数分别为 0.645、0.625 和 0.596。不同生草生物量之间的关系表明,生草在积累生物量的过程中不仅显示出生草与周围土壤养分因子的动态关系,同时不同生草间也存在一定的共性关系。不同生草间存在的共性关系在一定程度上能够反映土壤养分状况与肥力水平的高低(表 2)。

表 2 土壤肥力指标的相关矩阵(r 值)

Table 2 The correlation matrixes (r - values) between soil nutrient factors and soil properties

项目 Item	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13
X1	1	0.734**	0.339	0.645*	0.625*	-0.675*	0.842	0.893**	0.803**	-0.270	-0.007	0.975**	0.961**
X2		1	0.258	0.527	0.794**	-0.584*	0.540	0.798**	0.772**	0.789**	0.301	0.766**	0.802**
X3			1	0.120	-0.097	-0.695*	0.035	0.586*	0.566	0.630*	-0.041	0.449	0.523
X4				1	0.596*	-0.585*	-0.416	0.663*	0.633*	0.554	0.242	0.640*	0.592*
X5					1	-0.631*	0.470	0.523	0.591*	0.700*	-0.189	-0.226	0.607*
X6						1	-0.561	-0.772**	-0.827**	0.336	-0.250	-0.711**	-0.735**
X7							1	0.563	0.446	-0.848	-0.552	0.769	0.745
X8								1	0.943**	-0.061	0.333	0.946**	0.965**
X9									1	-0.017	0.418	0.887**	0.881**
X10										1	0.648±	0.216	-0.214
X11											1	0.080	0.128
X12												1	0.986**
X13													1

注: ** 0.01 水平显著, * 0.05 水平显著;表中 $X_i(i = 1, \cdots, 13)$ 分别指白三叶、红三叶、小冠花、鸡脚草、百脉根生物量、容重、水分、有机碳、全 N、硝态氮、铵态氮、速效磷、速效钾。

Note: ** Correlation is significant at the 0.01 level. * Correlation is significant at the 0.05 level. X1: *Trifolium repens* L. X2: *Trifolium pratense*. X3: *Coronilla varia* L. X4: *Dactylis glomerata* L. X5: *Lotus corniculatus*. X6: Bulk density, X7: water content, X8: Organic carbon, X9: Total N, X10: Nitrate nitrogen, X11: Ammonium nitrogen, X12: Available P, X13: Available K.

2.2.2 生草生物量与土壤养分因子的关系 由表 2 可知,生草生物量与土壤水分、有机碳、全 N、硝态氮、速效磷、速效钾呈正相关,说明其对生草生长具有促进作用;与水分、铵态氮相关性较差;而与土壤容重呈显著负相关说明土壤越疏松多孔,结构性好,容重小越有利于生草积累生物量^[37]。

白三叶与有机碳、全氮、速效磷和速效钾呈极显著相关,相关系数分别为 0.893、0.803、0.975、0.961,而与硝态氮相关性较差,仅为 0.270 说明土壤中硝态氮含量对白三叶的生长既不促进也不抑制。红三叶与有机碳、全氮、硝态氮、速效磷和速效钾呈极显著相关,相关系数分别为 0.798、0.772、0.789、0.766 和 0.802。小冠花与有机碳和硝态氮呈显著相关,相关系数分别为 0.586 和 0.630,而与全氮、速效磷和速效钾相关性差。

鸡脚草与有机碳、全氮、速效磷和速效钾呈显著正相关,相关系数分别为 0.663、0.633、0.640 和 0.592,说明其含量高有助于鸡脚草积累生物量。而与铵态氮的相关系数仅为 0.242,说明铵态氮对鸡脚草生物量的积累并无贡献。百脉根与全氮、硝态氮和速效钾呈显著相关,相关系数分别为 0.591、0.700 和 0.607,而与铵态氮和速效磷的相关性较差,分别为 0.189 和 0.226。

2.3 生草生物量与土壤理化性质的通径分析

两个变量之间的简单相关系数,往往不能正确地说明这两个变量之间的真正关系,因为在多个变量的反应系统中,任意两个变量的线性相关关系,都会受到其它变量的影响^[38],因此必须运用多元回归和通径分析方法。通径分析是一种因果机理分析方法,其直接和间接通径系数之和在数值上等于相关系数,能直接比较各原因因素的相对重要性,比相关和回归分析更为精确。它可揭示生草生物量与土壤各理化性质的密切程度,且能指出这种关系中哪种作用途径处于主导地位^[39]。

将白三叶、红三叶、小冠花、鸡脚草、百脉根生物量与土壤理化性质进行回归分析,得到 5 个标准多元回归方程:

$$\begin{aligned} B_1 &= 0.812X_1 + 0.029X_2 + 0.250X_3 - 0.037X_4 - 0.013X_5 - 0.166X_6 + 0.117X_7 \\ B_2 &= 0.847X_1 - 0.068X_2 + 0.124X_3 - 0.040X_4 + 0.040X_5 - 0.040X_6 + 0.148X_7 \\ B_3 &= 0.415X_1 - 0.069X_2 + 0.917X_3 - 0.011X_4 + 0.041X_5 + 0.091X_6 - 0.406X_7 \\ B_4 &= 0.265X_1 - 0.314X_2 + 0.696X_3 - 0.162X_4 + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &0.580X_5 + 0.069X_6 - 0.137X_7 \\ B_5 &= 0.817X_1 - 0.124X_2 + 0.297X_3 + 0.065X_4 + 0.021X_5 + 0.027X_6 - 0.094X_7 \end{aligned}$$

式中 $B_i(i = 1, \dots, 5)$ 为标准化的白三叶、红三叶、小冠花、鸡脚草、百脉根生物量, $X_i(i = 1, \dots, 7)$ 为标准化的理化性质, $i = 1$ 为容重, $i = 2$ 为有机碳, $i = 3$ 为全氮, $i = 4$ 为硝态氮, $i = 5$ 为铵态氮, $i = 6$ 为速效磷, $i = 7$ 为速效钾。将方程中的标准回归系数即直接通径系数乘以各理化性质的偏相关系数得到间接通径系数,结果见表 3。

直接通径系数反映各理化性质对生草生物量直接影响作用的大小。土壤肥力因子对白三叶生物量的直接作用系数(按绝对值大小)顺序为:容重 > 全氮 > 速效磷 > 速效钾 > 硝态氮 > 有机碳 > 铵态氮。土壤容重对白三叶生物量的直接通径系数最大为 0.812,说明其对白三叶生物量具有明显的直接效应,而且通过全氮对白三叶生物量有一定的间接作用,直接和间接通径系数之和也最大,达 0.996。硝态氮对白三叶生物量的影响不仅直接作用系数较小,而且通过其他因素对白三叶生物量的间接作用系数也小,这说明硝态氮在低肥力条件下对白三叶生物量的影响较小,其影响的直接和间接通径系数之和也较小,仅为 0.777。有机碳、全氮、铵态氮、速效磷和速效钾对白三叶生物量直接和间接通径系数都较小,说明它们对白三叶生物量的直接效应和间接效应都较小,不是影响白三叶生物量的主要因素。

土壤肥力因子对红三叶生物量的直接作用系数(按绝对值大小)顺序为:容重 > 速效钾 > 全氮 > 有机碳 > 速效磷 ≈ 硝态氮 ≈ 铵态氮。土壤容重对红三叶生物量的直接作用系数最大,为 0.847,其通过其他土壤理化因子对红三叶生物量的影响主要为正效应,故作用系数总和在所有因子中最高为 0.998,说明土壤容重是影响红三叶生物量的最主要因素。速效钾和全氮对红三叶生物量的直接通径系数不大,分别为 0.148 和 0.124,但通过其他因素对红三叶生物量的间接通径系数较大,尤其是通过土壤容重产生了明显的正向影响作用,速效钾和全氮是仅次于土壤容重的影响红三叶生物量的重要因素。

由表 3 可知,在所考察土壤肥力因子对小冠花生物量的各因素中,以全氮和土壤容重对小冠花生生物量的影响最为显著。土壤容重对小冠花生生物量的直接通径系数并不大,为 0.415,但其通过全氮产生的间接效应较大达 0.880,其影响的直接和间接通径系数之和最大,由此可见,土壤容重对小冠花生生物量的影响主要是通过间接作用产生的。铵态氮对小

冠花生物量的直接通径系数仅为 0.041,但其通过其它肥力因子产生强烈的间接作用,其影响的直接和间接通径系数之和仅次于土壤容重,达 0.976。有机碳、硝态氮、速效磷和速效钾对小冠花生物量直

接通径系数都较小,而且通过其他因素产生的间接通径系数之和也较小,说明它们对小冠花生物量的直接效应和间接效应都较小,不是影响小冠花生物量的主要因素。

表 3 土壤理化因子对生草生物量的通径系数

Table 3 Path coefficients between soil chemical and physical properties and herbage biomass

因变量 Dependent variable	自变量 Independent variable	容重 (X1) Bulk density	有机碳 (X2) Organic carbon	全 N (X3) Total N	硝态氮 (X4) Nitrate nitrogen	铵态氮 (X5) Ammonium nitrogen	速效磷 (X6) Available P	速效钾 (X7) Available K	合计 Total
白三叶生物量 <i>Trifolium repens</i> L. biomass	X1	<u>0.812</u>	0.026	0.232	-0.029	-0.012	-0.130	0.097	0.996
	X2	0.741	<u>0.029</u>	0.248	-0.026	-0.012	-0.159	0.115	0.936
	X3	0.753	0.029	<u>0.250</u>	-0.027	-0.012	-0.156	0.112	0.949
	X4	0.642	0.021	0.184	<u>-0.037</u>	-0.011	-0.092	0.070	0.777
	X5	0.731	0.026	0.230	-0.032	<u>-0.013</u>	-0.127	0.095	0.910
	X6	0.637	0.028	0.234	-0.021	-0.010	<u>-0.166</u>	0.116	0.818
	X7	0.673	0.028	0.239	-0.022	-0.011	-0.165	<u>0.117</u>	0.859
红三叶生物量 <i>Trifolium pretense</i> biomass	X1	<u>0.847</u>	-0.063	0.115	-0.033	0.034	-0.03	0.132	0.998
	X2	0.783	<u>-0.068</u>	0.124	-0.039	0.036	-0.039	0.147	0.944
	X3	0.788	-0.068	<u>0.124</u>	-0.039	0.035	-0.039	0.147	0.948
	X4	0.706	-0.066	0.120	<u>-0.040</u>	0.032	-0.039	0.146	0.859
	X5	0.716	-0.061	0.110	-0.032	<u>0.040</u>	-0.033	0.124	0.864
	X6	0.716	-0.066	0.121	-0.039	0.033	<u>-0.040</u>	0.146	0.871
	X7	0.754	-0.067	0.123	-0.039	0.034	-0.040	<u>0.148</u>	0.913
小冠花生物量 <i>Coronilla varia</i> L. biomass	X1	<u>0.415</u>	-0.066	0.880	-0.010	0.040	0.082	-0.344	0.997
	X2	0.395	<u>-0.069</u>	0.915	-0.011	0.038	0.089	-0.392	0.965
	X3	0.398	-0.069	<u>0.917</u>	-0.011	0.038	0.089	-0.390	0.972
	X4	0.385	-0.069	0.907	<u>-0.011</u>	0.037	0.089	-0.393	0.945
	X5	0.406	-0.063	0.848	-0.010	<u>0.041</u>	0.078	-0.324	0.976
	X6	0.374	-0.068	0.901	-0.011	0.035	<u>0.091</u>	-0.400	0.922
	X7	0.352	-0.067	0.880	-0.011	0.033	0.090	<u>-0.406</u>	0.871
鸡脚草生物量 <i>Dactylis glomerata</i> L. biomass	X1	<u>0.265</u>	-0.283	0.642	-0.141	0.574	0.050	-0.115	0.992
	X2	0.239	<u>-0.314</u>	0.693	-0.158	0.538	0.064	-0.135	0.927
	X3	0.244	-0.313	<u>0.696</u>	-0.159	0.549	0.064	-0.135	0.946
	X4	0.230	-0.306	0.682	<u>-0.162</u>	0.521	0.067	-0.135	0.897
	X5	0.262	-0.291	0.658	-0.145	<u>0.580</u>	0.053	-0.120	0.997
	X6	0.191	-0.291	0.643	-0.156	0.445	<u>0.069</u>	-0.133	0.768
	X7	0.223	-0.308	0.683	-0.160	0.510	0.067	<u>-0.137</u>	0.878
百脉根生物量 <i>Lotus corniculatus</i> biomass	X1	<u>0.817</u>	-0.112	0.274	0.054	0.020	0.025	-0.080	0.998
	X2	0.739	<u>-0.124</u>	0.295	0.063	0.018	0.024	-0.092	0.923
	X3	0.755	-0.123	<u>0.297</u>	0.063	0.019	0.024	-0.092	0.943
	X4	0.676	-0.120	0.288	<u>0.065</u>	0.016	0.021	-0.092	0.854
	X5	0.794	-0.106	0.262	0.051	<u>0.021</u>	0.023	-0.077	0.968
	X6	0.744	-0.112	0.268	0.051	0.018	<u>0.027</u>	-0.081	0.915
	X7	0.697	-0.121	0.292	0.064	0.017	0.023	<u>-0.094</u>	0.878

注:划横线的数据为直接通径系数。

Note: The data underlined are direct path coefficients.

土壤肥力因子对鸡脚草生物量的直接作用系数 (按绝对值大小)顺序为:全氮 > 铵态氮 > 有机碳 >

容重 > 硝态氮 > 速效钾 > 速效磷。全氮和铵态氮对鸡脚草生物量影响的直接通径系数较大, 分别为 0.696 和 0.580, 而且它们通过其它肥力因素产生的间接通径系数之和、两者彼此间对鸡脚草生物量的间接通径系数均较大, 从表观上表现为全氮和铵态氮均与鸡脚草生物量显著相关, 表明无论从单因素还是彼此间的相互作用考虑, 全氮和铵态氮都是影响鸡脚草生物量的重要因素。土壤容重对鸡脚草生物量的直接通径系数并不大, 仅为 0.265, 但其通过全氮和铵态氮产生的间接效应较大达 0.642 和 0.574, 其影响的直接和间接通径系数之和也较大, 为 0.992。因此, 土壤容重对鸡脚草生物量的影响主要是通过间接作用产生的。

土壤容重对百脉根生物量的直接作用系数最大达 0.817, 其作用系数总和也是最大, 但其通过其他因素产生的间接通径系数之和并不大, 因此, 土壤容重主要是通过直接作用对百脉根生物量产生影响的。全氮和铵态氮对百脉根生物量的直接通径系数相对较大, 且其通过容重、硝态氮产生的间接效应较大, 其影响的直接和间接通径系数之和也较大, 因此全氮和铵态氮是仅次于土壤容重影响百脉根生物量的主要因素。硝态氮和速效钾对百脉根生物量直接通径系数都较小, 且通过其它因素对百脉根生物量的间接通径系数之和也较小, 它们对百脉根生物量的直接效应和间接效应都较小, 不是影响白三叶生物量的主要因素(表 3)。

3 结 论

1) 不同生草草种地上生物量存在一定的差异, 小冠花的生物量明显高于其它 4 种生草, 其大小顺序表现为小冠花 > 百脉根 $\approx$ 鸡脚草 > 红三叶 $\approx$ 白三叶。地上生物量的平均值分布在 $150 \sim 300 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 范围内。随着土层深度的增加, 生草地下生物量逐渐降低, 浅层土壤的根系生物量明显高于深层土壤, 层次之间变化明显。生草地下生物量与土壤养分含量的变化规律基本一致, 但并不完全相同。

2) 综合 5 种生草的通径分析得出, 土壤肥力因子对白三叶生物量的直接作用系数大小(绝对值)顺序为: 容重 > 全氮 > 速效磷 > 速效钾 > 硝态氮 > 有机碳 > 铵态氮; 土壤肥力因子对红三叶生物量的直接作用系数大小(绝对值)顺序为: 容重 > 速效钾 > 全氮 > 有机碳 > 速效磷 $\approx$ 硝态氮 $\approx$ 铵态氮; 土壤肥力因子对小冠花生物量的直接作用系数大小(绝对值)顺序为: 全氮 > 容重 > 速效钾 > 速效磷 > 有机碳 > 铵态氮 > 硝态氮; 土壤肥力因子对鸡脚草生物量的直接作用系数大小(绝对值)顺序为: 全氮 > 铵态

氮 > 有机碳 > 容重 > 硝态氮 > 速效钾 > 速效磷; 土壤肥力因子对百脉根生物量的直接作用系数大小(绝对值)顺序为: 容重 > 全氮 > 有机碳 > 速效钾 > 硝态氮 > 速效磷 > 铵态氮。

3) 由相关系数和通径分析可知: 土壤容重和全氮通过直接和间接效应成为影响该区白三叶、红三叶、小冠花、鸡脚草、百脉根生物量的主导因子; 有机碳和速效钾主要通过间接作用对生草生物量的累积产生影响, 是影响 5 种生草生物量的重要因素; 此外, 硝态氮、铵态氮和速效磷对生草生物量有一定影响且均主要体现为间接效应, 是影响 5 种生草生物量的次要因素。

4) 生草生物量与土壤容重、有机质、全氮、硝态氮、铵态氮、速效磷和速效钾均有显著差异, 生草生物量对多种养分因子的多元回归可以解释生物量变化, 通径分析能更全面和客观地评价土壤理化因子和果园生草生物量之间的关系。

参 考 文 献:

- [1] 王艳廷, 冀晓昊, 吴玉森, 等. 我国果园生草的研究进展[J]. 应用生态学报, 2015, 26(6): 1892-1900.
- [2] 李会科, 梅立新, 高 华. 黄土高原旱地苹果园生草对果园小气候的影响[J]. 草地学报, 2009, 17(5): 615-620.
- [3] 郝淑英, 刘蝴蝶, 牛军玲, 等. 黄土高原区果园生草覆盖对土壤物理性状、水分及产量的影响[J]. 土壤肥料, 2003, (1): 25-27.
- [4] 徐明岗, 文石林, 高菊生. 红壤丘陵区不同种草模式的水土保持效果与生态环境效应[J]. 水土保持学报, 2001, 15(1): 77-80.
- [5] 张 猛, 张 健, 徐 雄, 等. 土壤管理方式对果-草人工生态系统土壤性质影响[J]. 林业科学, 2006, 42(8): 44-49.
- [6] 毛培春, 孟 林, 张国芳, 等. 白三叶对桃园小气候和桃品质的影响[J]. 草地学报, 2006, 14(4): 360-364.
- [7] 张文利, 吴步梅, 马浩轩, 等. 生草对高海拔凉爽干旱地区杏园生态环境及果实品质的影响[J]. 北方园艺, 2014, (6): 24-27.
- [8] Xu L F, Zhou P, Han Q F, et al. Spatial distribution of soil organic matter and nutrients in the pear orchard under clean and sod cultivation modes[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(2): 344-351.
- [9] 李会科, 张广军, 赵政阳, 等. 渭北黄土高原旱地果园生草对土壤物理性质的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(7): 2070-2076.
- [10] 张成梁, 程冬兵, 刘士余. 红壤坡地果园植草的水土保持效应[J]. 草地学报, 2006, 14(4): 365-369.
- [11] 李国怀, 伊华林. 生草栽培对柑橘园土壤水分与有效养分及果实产量、品质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(2): 161-163.
- [12] 邓 蕾, 上官周平. 陕西省天然草地生物量空间分布格局及其影响因素[J]. 草地学报, 2012, 20(5): 825-835.
- [13] 马文红, 杨元合, 贺金生, 等. 内蒙古温带草地生物量及其与环境因子的关系[J]. 中国科学(C辑: 生命科学), 2008, 38(1): 84-92.
- [14] Daniel L. Williams, David B. Hodge. Impacts of delignification and hot water pretreatment on the water induced cell wall swelling behavior of grasses and its relation to cellulolytic enzyme hydrolysis and

binding[J]. *Cellulose*, 2014,21(1):221-235.

[15] V. P. Klimenko, V. M. Kosolapov. Ensiling high – protein perennial grasses using enzyme preparations[J]. *Russian Agricultural Sciences*, 2014,40(1):35-38.

[16] N. Ya. Shmyreva, O. A. Sokolov, A. A. Zavalin. Features of nitrogen microorganism assimilation of perennial grasses phytomass in soils of a different degree of erosion[J]. *Russian Agricultural Sciences*, 2014,40(4):271-274.

[17] 刘富庭,张林森,李雪薇,等.生草对渭北旱地苹果园土壤有机碳组分及微生物的影响[J].*植物营养与肥料学报*,2014,20(2):355-363.

[18] 焦奎宝.生草制苹果园土壤微生物群落结构与功能特征研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2014.

[19] 钱进芳,吴家森,黄坚钦.生草栽培对山核桃林地土壤养分及微生物多样性的影响[J].*生态学报*,2014,34(15):4324-4332.

[20] 吴家森,张金池,钱进芳,等.生草提高山核桃林土壤有机碳含量及微生物功能多样性[J].*农业工程学报*,2013,29(20):111-117.

[21] 司 鹏,乔宪生.清耕和生草对沙地葡萄园土壤酶活性的空间影响[J].*果树学报*,2014,31(2):238-244.

[22] 贾曼莉,郭 宏,李会科.渭北生草果园土壤有机碳矿化及其与土壤酶活性的关系[J].*环境科学*,2014,35(7):2777-2784.

[23] 王艳廷,冀晓昊,张艳敏,等.自然生草对黄河三角洲梨园土壤物理性状及微生物多样性影响[J].*生态学报*,2015,35(16):1-16.

[24] 田常杰,李 岩,王智华.银杏园生草对土壤理化性状及酶活性的影响[J].*江苏农业科学*,2015,43(5):321-323.

[25] S.W. Culman, S.T. DuPont, J.D. Glover, et al. Long-term impacts of high-input annual cropping and unfertilized perennial grass production on soil properties and belowground food webs in Kansas, USA[J]. *Agricultural Ecosystems and Environment*, 2009,137(1):13-24.

[26] 陈新燕,孙 霞,柴仲平,等.不同土壤管理方式对南疆梨园土壤性质的影响[J].*陕西农业科学*,2014,60(4):16-19,31.

[27] 高小叶,张兴兴,朱建国,等.生草栽培对果园面源污染的控制:三种牧草的比较研究[J].*草业学报*,2015,24(2):49-54.

[28] 李发林,郑域茹,郑 涛,等.果园带状生草对果园面源污染的控制效果[J].*水土保持学报*,2013,27(3):82-89.

[29] Marc Duchemin, Richard Hogue. Reduction in agricultural non-point source pollution in the first year following establishment of an integrated grass/tree filter strip system in southern Quebec (Canada)[J]. *Agricultural Ecosystems and Environment*, 2008,131(1):85-97.

[30] 郑伟尉,徐 凯,刘兴泉,等.自然生草对梨园小气候生态因子和果实品质的影响研究[J].*中国南方果树*,2013,42(5):28-32.

[31] 张玉岱.生草对渭北苹果园土壤有机碳的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2014.

[32] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000:33-34.

[33] 王英俊.生草对渭北苹果园土壤团聚体及其有机 C、N 的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2013.

[34] 吴晓荣,叶祥盛,赵竹青.流动注射法与凯氏定氮法测定土壤全氮的比较[J].*华中农业大学学报*,2009,28(5):560-563.

[35] 张建民,王 猛,葛晓萍,等.ICP – AES 法与传统 FAAS 法测定土壤速效钾和钠的数据可转换性研究[J].*光谱学与光谱分析*,2009,29(5):1405-1408.

[36] 徐建华.现代地理学中的数学方法[M].北京:高等教育出版社,2002.

[37] 刘晚苟,李良贤,谢海容,等.土壤容重对野生香根草幼苗根系形态及其生物量的影响[J].*草业学报*,2015,24(4):214-220.

[38] 胡小平,王长发.SAS 基础及统计实例教程[M].西安:西安地图出版社,2001.

[39] 安韶山,黄懿梅,刘梦云.宁南山区土壤酶活性特征及其与肥力因子的关系[J].*中国生态农业学报*,2007,15(5):55-58.

(上接第 171 页)

[7] 李军民,王建锋.陕西洛川苹果园土壤肥力与施肥状况调查[J].*西北园艺*,2011,(10):45-47.

[8] 隋鹏飞,史进元,李文祥.陕西省红富士苹果园施肥调查[J].*土壤肥料*,1995,(1):35-37.

[9] 刘侯俊,巨晓棠,同延安,等.陕西省主要果树的施肥现状及存在问题[J].*干旱地区农业研究*,2002,20(1):38-44.

[10] 王圣瑞,马文奇,徐文华,等.陕西省苹果施肥状况与评价[J].*干旱地区农业研究*,2004,22(1):146-151.

[11] 鲍士旦.土壤农化分析(第三版)[M].北京:中国农业出版社,1999.

[12] 王小英,同延安,等.陕西省苹果施肥状况评价[J].*植物营养与肥料学报*,2013,19(1):206-213.

[13] 王雷存,辛永军.金世纪苹果在陕西渭北旱原地区引种栽培[J].*北方园艺*,2012,(7):42-43.

[14] 刘子龙,张广军.陕西苹果主产区丰产果园土壤养分状况的调查[J].*西北林学院学报*,2006,21(2):50-53.

[15] 朴顺姬,朴 宇,朱虎烈,等.不同氮磷钾比例对苹果梨品质的影响[J].*吉林农业科学*,2002,27(2):30-34.

[16] 彭福田.氮素对苹果果实发育与产量、品质的调控[D].泰安:山东农业大学,2001.

[17] 刘汝亮.苹果园养分资源综合管理技术研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2007.

[18] 赵佐平.施肥对渭北旱塬富士苹果产量及品质的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2009.

[19] 卢树昌,陈 清,张福锁,等.河北果园主分布区土壤磷素投入特点及磷负荷风险分析[J].*中国农业科学*,2008,41(10):3149-3157.

[20] Haynes R J. Origin, distribution, and cycling of nitrogen in terrestrial ecosystems[C]//Haynes R J. *Mineral nitrogen in the plant – soil system*. New York: Academic Press Inc,1986:46-51.

[21] 赵佐平,同延安.渭北旱塬苹果园施肥现状分析评估[J].*中国生态农业学报*,2012,20(8):1003-1009.