

# 浙西南毛竹林覆盖对土壤渗透性及生物特征的影响

王意锟<sup>1</sup> 金爱武<sup>1\*</sup> 方升佐<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>丽水学院, 浙江丽水 323000; <sup>2</sup>南京林业大学, 南京 210037)

**摘要** 对浙西南山区4种不同覆盖年限下毛竹林地的土壤入渗、土壤理化性质、土壤根系和土壤动物特征进行了研究。结果表明:不同覆盖年限林地及同一林地不同土壤层次下土壤渗透性能存在较大差异,随着土层加深各林地土壤渗透性能均降低。渗透性能表现为覆盖1次林地>未覆盖林地>覆盖2次和3次后的林地。Kostiakov模型适合该研究区域的土壤水分入渗过程模拟。随着林地覆盖年限的增加(4~6年),林地土壤总孔隙度、非毛管孔隙度、pH值显著降低,而土壤容重、有机质和全N含量则显著提高。土壤初渗率、稳渗率、平均渗透率和渗透总量等均随根长密度减少而变小,土壤入渗能力的变化与直径0.5~5.0 mm的根长密度有关。不同覆盖年限毛竹林地土壤动物的平均密度差异显著,覆盖1次的林地最高,而覆盖3次的林地最低。综合纲、唇足纲、倍足纲、膜翅目、伪蝎目等大中型节肢动物,蜚蠊目甲螨亚目、中气门亚目,以及弹尾目棘跳科、长角跳科、疣跳科、驼跳科等小型节肢动物数量的减少不利于土壤水分入渗。毛竹林长期覆盖会使土壤理化性状劣变,减弱土壤入渗性能,限制土壤动物活动,进而导致毛竹林退化。

**关键词** 毛竹; 覆盖; 土壤渗透性; 根长密度; 土壤动物

**Effects of mulching management of *Phyllostachys heterocycla* forests on the characteristics of soil infiltration and biometrics in southwest Zhejiang Province, China.** WANG Yi-kun<sup>1</sup>, JIN Ai-wu<sup>1\*</sup>, FANG Sheng-zuo<sup>2</sup> (<sup>1</sup>Lishui College, Lishui 323000, Zhejiang, China; <sup>2</sup>Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China).

**Abstract:** Soil infiltration, soil physical and chemical properties, root length density and soil fauna diversity were studied in *Phyllostachys heterocycla* forests with different mulching times in southwest Zhejiang Province, China. Significant differences of soil infiltration capability were found among the forests with different mulching times and among soil layers. Soil infiltration capability generally declined in the deeper soil layers. With mulching management, soil infiltration capability increased under the first mulching, and then declined with the increase of mulching times. The Kostiakov model was suitable for simulating soil infiltration process. With the extending of mulching times (4 to 6 years), soil pH and total/non-capillary porosity decreased, while soil bulk density, soil organic matter and total nitrogen contents increased significantly. Soil initial, steady, and average infiltration rates as well as the cumulative infiltration amount correlated closely with the length density of roots with diameter from 0.5 mm to 5.0 mm, showing a decreasing tendency with the decrease in root length density. Soil fauna density was highest in the forest under the first mulching, and was lowest after third mulching. The decreased numbers of large and meso-arthropods, including Symphyla, Chilopoda, Diplopoda, Hymenoptera and pseudoscorpions, and the micro-arthropods, including Oribatida, Mesostigmata, Onychiuridae, Neanuridae, Cyphoderidae, and Entomobryidae, showed negative effects on soil infiltration. In conclusion, long-term mulching changed soil physical and chemical properties, decreased soil infiltration capability, and suppressed the development of soil fauna, which might cause the decline of *P. heterocycla* forests.

**Key words:** *Phyllostachys heterocycla*; mulching; soil infiltration characteristics; root length density; soil fauna.

本文由国家重点基础研究发展计划项目(2012CB416904)资助 This work was supported by the National Basic Research Program of China (2012CB416904).

2016-08-18 Received, 2017-03-14 Accepted.

\*通讯作者 Corresponding author. E-mail: kinaw@zafu.edu.cn

土壤渗透指降水或其他形式地表水进入土壤的过程,其渗透能力决定了灌溉、降水过程中地面径流量的调节和转换,是反映土壤涵养水源和水土保持功能的重要参数.毛竹(*Phyllostachys heterocycla*)为浙西南山区森林资源的重要组成部分.山地毛竹林水分供应不便,而出笋数很大程度上与孕笋期水分情况有关,只有较高的林地水分利用效率才能保证发笋率和孕笋率.当土壤入渗能力较差时,在较陡的山地灌溉易出现较大地表径流量,林地水分利用率低,不利于笋芽生长,还会造成水土流失;在地势平缓的区域,水分难以向下渗透会在土壤表层滞滞,造成烂鞭现象,使可以萌发笋芽的有效鞭段减少.目前,对土壤渗透性的研究,涉及植被类型、凋落物层、土壤理化性质、土壤微生物等多个方面<sup>[1-3]</sup>.研究表明,土壤渗透性与土壤理化性质关系密切<sup>[4-5]</sup>.而植物根系在土壤中穿插及土壤生物的频繁活动也会改变土壤性状.但土壤渗透性与土壤动物及植物细根径级、密度之间关系的研究相对较少<sup>[3,6]</sup>.

浙西南山区为我国重要毛竹产区,毛竹林往往在发笋期覆盖潮湿的秸秆、砻糠作为发热材料,发酵增温,促进冬笋早发、多发.但长期覆盖会改变土壤微环境(温度、湿度和通气性),导致林地土壤结构发生变化<sup>[7]</sup>.有研究发现,施肥、劈草、灌水等林地经营活动会改变土壤容重、土壤孔隙度等理化特征,进而影响土壤渗透性能<sup>[8]</sup>,而土壤渗透性能是影响竹林水分利用与生产力的重要因素.毛竹林地覆盖作为浙西南地区常用的竹笋多发技术,其对土壤渗透性能影响的研究尚未见报导.本文对浙西南4种覆盖年限毛竹林土壤渗透性展开调查,探讨了不同覆盖时间下土壤渗透性发生的变化,及其与土壤理化性质、土壤动物多样性、植物细根特征的关系,旨在为制定合理的山地毛竹林水分高效利用与立地生产力维持的措施提供参考.

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区设在浙江省遂昌县(28°13'—28°49' N, 118°41'—119°30' E),属中亚热带季风气候区.年平均气温 16.8℃,极端最高气温 40.1℃,极端最低气温 -9.9℃,无霜期 251 d,降水量 1510 mm.土壤类型为山地黄红壤,海拔 320~365 m,坡度 13°~16°,土层厚度>100 cm.

### 1.2 试验设置与土壤采集

毛竹笋用林以采收冬春笋以及鞭笋为主,冬笋

大年林地于4、8、11和12月中旬覆盖前施肥.冬笋大年11、12月中旬在林地进行覆盖,下层增温层采用潮湿的竹叶、稻草(含水量75%左右)作为发酵增温材料,厚度约为10 cm,上层保温层采用砻糠,厚度约为20 cm.覆盖期保持土壤平均温度在13~14℃,促进冬笋早发.冬笋小年于8月施肥1次,不覆盖,也不进行挖笋.

2014年10月于立地条件、立竹度、竹林结构基本一致的4种不同覆盖年限的毛竹笋用林进行取样.4种覆盖年限样地为:1)对照样地(未覆盖);2)覆盖1次样地,林地从2013年起开始覆盖,2013年为冬笋大年,而2014年为冬笋小年,未覆盖;3)覆盖2次样地,林地从2011年起开始覆盖,分别于2011和2013年这2个冬笋大年进行覆盖,而2012和2014年为冬笋小年,未覆盖;4)覆盖3次样地,林地从2009年起开始覆盖,分别于2009、2011和2013年这3个冬笋大年进行覆盖,而2010、2012和2014年为冬笋小年,未覆盖.每种覆盖年限的处理分别于遂昌县小忠村、十三都村、坑口村设置20 m×20 m的样地各1块.每一样地沿对角线取3个土壤剖面,于0~20、20~40、40~60 cm土层处用环刀取样,每个土层重复3次.土样于0.05 mm网筛内冲洗后,将根系放入装有蒸馏水的蒸发皿中,用根系分析系统进行细根特征分析.各土层另取土样用于基本理化性质的测定.此外,每块样地沿对角线用土钻法采集土样18份,用于土壤动物的鉴定.

### 1.3 测定项目与方法

土壤容重等物理性质用环刀法测定,土壤渗透性用双环刀法测定,环刀规格20 cm<sup>2</sup>×5 cm.土壤化学性质测定参照《土壤农业化学分析方法》<sup>[9]</sup>.大型土壤动物分离采用手检法,中小型土壤动物分离采用Tullgern干漏斗法,土样在25 W白炽灯下烘烤24 h,漏斗底部用装有75%酒精溶液的培养皿收集土壤动物,并将土壤动物保存在75%酒精溶液中.土壤动物分离、鉴定参照《中国土壤动物检索图鉴》<sup>[10]</sup>和《中国亚热带土壤动物》<sup>[11]</sup>.细根特征分析由根系分析系统(WIN Rhizo)完成.

### 1.4 土壤渗透性计算

初渗率=最初入渗时段内渗透量/入渗时间(最初入渗时间取前2 min).稳渗率为单位时间内的渗透量趋于稳定(单位时间入渗水量相等)的渗透速率.平均渗透速率=达到稳渗时的渗透总量/达到稳渗时的时间.因各样地土壤的渗透速率在1 h内均达到稳定,为便于比较,渗透总量统一取前60 min

内的渗透量。

1.5 土壤水分入渗模型

Kostiakov 模型：  
$$f(t) = at^{-b}$$
  
式中： $f(t)$  为入渗速率 ( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )； $t$  为入渗时间 ( $\text{min}$ )； $a$ 、 $b$  为拟合参数。

Philip 模型：  
$$f(t) = 1/2st^{-1/2} + a$$
  
式中： $s$  为土壤吸水率。

Horton 模型：  
$$f(t) = f_0 + (f - f_0)e^{-kt}$$
  
式中： $f_0$ 、 $f$  分别为稳定入渗率、初始入渗率； $k$  为拟合参数。

1.6 数据处理

采用 Excel 2003、SPSS 16.0 和 Canoco 4.5 软件对数据进行统计分析,采用单因素方差分析法 (one-way ANOVA) 进行方差分析,Duncan 法进行多重比较 ( $\alpha=0.05$ )。采用非线性回归进行土壤渗透数学模型拟合。采用冗余分析 (redundancy analysis, RDA) 法对毛竹林土壤渗透性能与根系特征、土壤理化性质、土壤动物多样性特征等环境因子间的关系进行冗余分析。利用 Excel 2003 软件作图。图中数据为平均值 $\pm$ 标准差。

2 结果与分析

2.1 不同覆盖年限下土壤入渗特征

土壤入渗性能直接关系到地表的径流量,渗透性能良好的土壤,在一定降水强度下可将水分贮存或变为土内径流,不易形成地表径流,土壤侵蚀量也较小。通过最初渗透速率 (初渗率)、最终渗透速率 (稳渗率)、平均渗透速率和渗透总量这 4 个指标对不同土壤层次进行综合评价,可较全面地反映不同降雨时长、降雨强度下土壤水分的渗透性能。由图 1 可知,在 0~40 cm 土层,4 种覆盖年限的初渗率、稳渗率、平均渗透速率和渗透总量均存在较大差异,覆盖 1 次的林地土壤入渗特性较好,未覆盖林地次之,而覆盖 2 次、3 次后的林地相对较差。4 种覆盖年限林地均表现出随着土层加深土壤渗透性能降低的规律,且不同林地间 40~60 cm 土层的各渗透指标均差异不显著,这可能是因为 40 cm 以下土层受到人为干扰较少,土壤容重较大。

非线性回归通过决定系数  $R^2$  反映所拟合模型的优劣。由表 1 可以看出,Kostiakov 模型拟合的  $R^2$  为 0.71~0.99;Philip 模型的  $R^2$  为 0.66~0.99;Horton

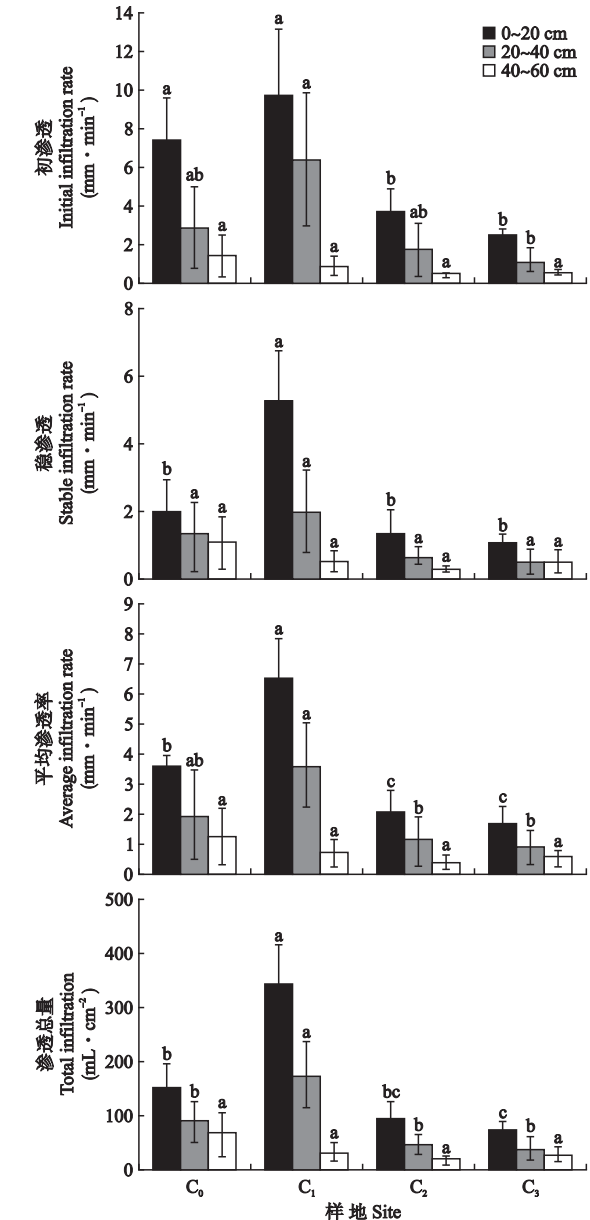


图 1 不同覆盖处理土壤水分入渗特性  
Fig.1 Soil infiltration characteristics under different mulching treatments.  
C<sub>0</sub>: 未覆盖样地 Non-mulching stand; C<sub>1</sub>: 覆盖 1 次样地 The first mulching stand; C<sub>2</sub>: 覆盖 2 次样地 The second mulching stand; C<sub>3</sub>: 覆盖 3 次样地 The third mulching stand. 同一土层不同字母表示不同样地间差异显著 ( $P<0.05$ ) Different letters in the same soil layer meant significant difference among different sampling sites at 0.05 level. 下同 The same below.

模型的  $R^2$  为 0.63~0.94。从拟合效果看,在 12 个土壤水分最优模型中,Kostiakov 模型占 9 个,Philip 模型占 2 个,Horton 模型占 1 个,说明 Kostiakov 模型更适合模拟该研究区域的土壤水分入渗过程。

2.2 土壤入渗特性与不同径级的根长密度

冗余分析是将线性相关分析和排序分析相结合形成的多元排序分析,通过对不同径级下根长密度

表 1 不同覆盖处理下毛竹林地土壤水分入渗模型  
Table 1 Soil infiltration models in *Phyllostachys heterocycla* forests under different mulching treatments

样地 Site	土层 Soil layer (cm)	Kostiakov 模型 Kostiakov model			Philip 模型 Philip model			Horton 模型 Horton model	
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>s</i>	<i>a</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>k</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>
<i>C</i> <sub>0</sub>	0~20	10.91	0.54	0.98 **	22.35	0.35	0.99 **	0.15	0.92 **
	20~40	4.06	0.33	0.92 **	7.42	0.68	0.89 **	0.09	0.91 **
	40~60	1.78	0.20	0.96 **	2.25	0.75	0.94 **	0.16	0.80 **
<i>C</i> <sub>1</sub>	0~20	11.42	0.24	0.99 **	17.99	3.54	0.98 **	0.13	0.94 **
	20~40	10.08	0.41	0.86 **	17.30	1.40	0.78 **	0.07	0.89 **
	40~60	1.23	0.29	0.81 **	2.05	0.29	0.79 **	0.13	0.74 **
<i>C</i> <sub>2</sub>	0~20	4.91	0.38	0.96 **	9.39	0.52	0.95 **	0.10	0.94 **
	20~40	2.91	0.49	0.88 **	5.78	0.04	0.84 **	0.13	0.81 **
	40~60	0.70	0.32	0.71 **	1.23	0.14	0.66 *	0.09	0.63 *
<i>C</i> <sub>3</sub>	0~20	3.34	0.35	0.87 **	6.12	0.50	0.85 **	0.10	0.84 **
	20~40	1.82	0.34	0.78 **	3.38	0.27	0.74 **	0.08	0.77 **
	40~60	0.68	0.13	0.93 **	0.62	0.41	0.94 **	0.21	0.78 **

\* *P*<0.05; \*\* *P*<0.01.

的数据进行排序(直接梯度分析),探讨 4 种覆盖年限下土壤入渗特性与不同径级根长密度的关系。

从图 2 可知,第 1 轴和第 2 轴的贡献率分别为 67.0%、29.8%,可以解释 96.8%以上原变量的特征。未覆盖和覆盖 1 次林地的根长密度特征分布在第 1 轴的正轴方向,且与 9 种径级的根长密度呈不同程度的正相关关系,而覆盖 2 次和覆盖 3 次的样地则偏移至第 1 轴的负轴方向,说明连续两次以上覆盖会使林地土壤单位体积内根系长度减小。

土壤的入渗特征( $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ )与径级Ⅱ~Ⅷ(0.5~5 mm)的根长密度均存在正相关关系,且入渗特征与Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ径级(1.5~3 mm)的根长密度关系最为密切,而径级为Ⅰ(<0.5 mm)和Ⅸ(>5 mm)的

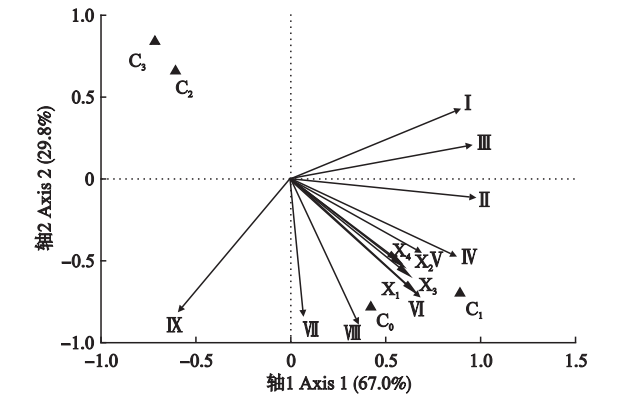


图 2 不同覆盖处理下根长密度的冗余分析  
Fig.2 Redundancy analysis of root length density under different mulching treatments.

Ⅰ:  $D<0.5$  mm; Ⅱ:  $0.5\text{ mm}<D<1$  mm; Ⅲ:  $1\text{ mm}<D<1.5$  mm; Ⅳ:  $1.5\text{ mm}<D<2$  mm; Ⅴ:  $2\text{ mm}<D<2.5$  mm; Ⅵ:  $2.5\text{ mm}<D<3$  mm; Ⅶ:  $3\text{ mm}<D<4.0$  mm; Ⅷ:  $4.0\text{ mm}<D<5.0$  mm; Ⅸ:  $D>5$  mm.  $X_1$ : 初渗率 Initial infiltration rate;  $X_2$ : 稳渗率 Stable infiltration rate;  $X_3$ : 平均渗透速率 Average infiltration rate;  $X_4$ : 渗透总量 Total infiltration. 下同 The same below.

根长密度对土壤水分渗透性能的影响较小。

### 2.3 土壤入渗特性与土壤理化性质

由表 2 可以看出,在 0~20 cm 土层,与未覆盖毛竹林地相比,覆盖 1 次的林地土壤非毛管孔隙度和全 N 含量显著提高,而土壤容重、总孔隙度、有机质等指标没有显著变化,说明林地短期使用潮湿的有机物料发酵分解并未使土壤性状发生劣变,对一些理化性质还有所改善。但随着覆盖次数的增加,林地土壤的性状有所改变。连续覆盖 3 次后,土壤 pH、总孔隙度、非毛管孔隙度等特征显著低于未覆盖林地,而土壤容重则显著高于未覆盖林地,这是因为有机物料在发酵增温的过程中产生大量酚酸类物质,促使土壤趋于酸化,土壤板结,造成原有团聚体结构破坏。随着土层深度的增加,不同覆盖年限下土壤理化性质的差异逐渐减小,在 40~60 cm 土层,4 种处理的土壤容重、总孔隙度、pH 均无显著差异。

由图 3 可以看出,第 1 轴解释了土壤理化性质变异的 75.9%,第 2 轴解释了 19.0%,二者累计贡献率为 94.9%。第 1 轴与有机质、全 N 等养分指标有较好的相关性,主要反映了土壤化学性质的变化,而第 2 轴与孔隙度、土壤容重等指标的相关性较好,反映了土壤物理性质的变化。由图 3 可知,土壤的入渗特征( $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ )与土壤容重呈负相关,与总孔隙度、非毛管孔隙度呈正相关,说明土壤容重越大,土壤越紧实粘重,孔性越差,渗透性越弱。

### 2.4 土壤入渗特性与土壤动物多样性

土壤动物在生态系统的物质循环中起着重要作用<sup>[12-15]</sup>,而环境劣变、人为干扰等因素往往会改变土壤动物的个体数和类群数,进而影响其生态功能<sup>[16-17]</sup>。本研究共采集土壤动物 27 个类群,隶属



表 2 不同覆盖处理下土壤基本理化性质  
Table 2 Soil physical and chemical properties under different mulching treatments

土层 Soil layer (cm)	样地 Site	土壤容重 Soil bulk density (g·cm <sup>-3</sup> )	总孔隙度 Total porosity (%)	毛管孔隙 Capillary porosity (%)	非毛管孔隙 Non-capillary porosity (%)	pH	有机质 Organic matter (g·kg <sup>-1</sup> )	全 N Total N (g·kg <sup>-1</sup> )	有效 P Available P (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效 K Available K (mg·kg <sup>-1</sup> )
0~20	C <sub>0</sub>	1.11±0.10b	58.3±4.8a	49.6±5.9a	8.7±0.7b	4.92±0.14a	13.66±3.78b	1.24±0.37b	4.18±1.31a	75.05±10.37b
	C <sub>1</sub>	1.14±0.15ab	56.9±3.3a	46.8±4.3a	10.1±0.6a	4.75±0.11a	17.75±5.52ab	2.15±0.32a	4.34±1.43a	80.44±15.43ab
	C <sub>2</sub>	1.21±0.19ab	53.5±5.5ab	48.6±3.8a	4.9±1.0c	4.44±0.08b	20.82±3.84ab	2.44±0.47a	4.53±1.87a	100.68±17.28ab
	C <sub>3</sub>	1.34±0.08a	49.3±3.0b	45.8±3.5a	3.5±1.8c	4.27±0.21b	25.76±4.11a	2.78±0.21a	5.12±1.21a	113.82±19.53a
20~40	C <sub>0</sub>	1.18±0.06b	52.6±6.8ab	47.4±6.0ab	5.2±1.5a	5.03±0.16a	10.73±3.65a	0.83±0.57a	2.57±1.17a	57.35±10.75a
	C <sub>1</sub>	1.21±0.07b	52.5±3.5a	46.5±2.2a	6.0±0.7a	4.95±0.11a	12.44±2.91a	1.22±0.14a	2.85±1.61a	52.17±12.83a
	C <sub>2</sub>	1.22±0.14ab	49.2±6.2ab	43.9±6.9ab	5.3±3.1a	4.62±0.37ab	14.84±2.74a	1.42±0.52a	2.91±1.03a	63.44±16.85a
	C <sub>3</sub>	1.42±0.09a	44.0±3.6b	40.6±3.0b	3.4±2.5a	4.52±0.22b	18.41±4.36a	1.71±0.38a	3.27±0.86a	73.63±9.48a
40~60	C <sub>0</sub>	1.26±0.13a	49.5±6.4a	46.1±7.1a	3.4±1.4a	5.08±0.34a	6.41±3.44a	0.45±0.36a	1.66±0.67a	43.28±15.27a
	C <sub>1</sub>	1.29±0.21a	48.8±4.8a	45.8±4.2a	3.1±0.7a	5.14±0.38a	6.80±3.85a	0.73±0.19a	1.57±0.63a	50.45±11.34a
	C <sub>2</sub>	1.32±0.11a	46.3±4.4a	42.7±5.3a	3.5±2.0a	4.65±0.24a	8.11±1.28a	1.12±0.53a	1.88±0.94a	52.56±13.78a
	C <sub>3</sub>	1.45±0.16a	45.4±8.0a	41.6±7.5a	3.7±0.8a	4.72±0.17a	11.32±4.31a	1.06±0.47a	1.82±1.23a	54.42±17.65a

同一土层不同字母表示不同样地间差异显著( $P<0.05$ ) Different letters in the same soil layer meant significant difference among different sampling sites at 0.05 level. 下同 The same below.

表 3 不同覆盖处理下毛竹林土壤动物的功能种团  
Table 3 Soil fauna guilds in *Phyllostachys heterocycla* forests under different mulching treatments

样地 Site	腐食性土壤动物 Saprophagous soil fauna		植食性土壤动物 Phytophagous soil fauna		捕食性土壤动物 Predatory soil fauna	
	类群数 Group number	密度 Density (ind·m <sup>-2</sup> )	类群数 Group number	密度 Density (ind·m <sup>-2</sup> )	类群数 Group number	密度 Density (ind·m <sup>-2</sup> )
C <sub>0</sub>	9.33±0.52a	12304.56±3138.44b	4.62±0.74a	1229.67±772.51ab	3.12±0.55a	1126.57±659.97a
C <sub>1</sub>	10.65±1.80a	26084.32±4393.53a	3.41±1.13a	1993.15±868.32a	4.50±0.83a	606.61±451.96a
C <sub>2</sub>	8.04±1.55a	14818.67±2536.60b	2.46±1.61ab	779.93±490.22ab	3.36±0.51a	1298.89±825.76a
C <sub>3</sub>	10.17±1.09a	6586.07±2152.91c	1.18±0.45b	259.98±219.23b	2.17±1.94a	258.98±232.53a

2 门 6 纲 16 目 3 亚目.按照食性差异将土壤动物分为 3 个功能种团<sup>[18-19]</sup>:1) 腐食性:膜翅目、啮目、蜚蠊目甲螨亚目、双翅目幼虫、弹尾目的等节跳科、长角跳科等;2) 植食性:综合纲、直翅目、鳞翅目与鞘

翅目的幼虫等;3) 捕食性:唇足纲、蛛形纲、双尾目、伪蝎目、鞘翅目隐翅甲科等.尽管这种分类方法对一些杂食性土壤动物划分不够准确,但在目前尚无法将各类群动物生态习性细分类的情况下,为土壤动物生态功能的研究过程提供了方便<sup>[20]</sup>.

总的来说,不同覆盖年限的林地中土壤动物均表现为腐食性动物分布密度较高(占总个体数 83.9%~92.7%),而植食、捕食性动物的密度相对较低(占总个体数 7.3%~16.1%).腐食性土壤动物对系统内养分循环和能量流动影响较大,与未覆盖的毛竹林地相比,初次覆盖有机物料使腐食性土壤动物数量显著提高,连续 3 次覆盖后,腐食性动物个体数显著下降,但类群数没有明显变化.

以 4 种林地中的土壤动物个体数为响应变量进行冗余分析.结果表明,第 1、第 2 轴的累计贡献率为 45.5%,第 1 轴解释土壤动物个体数变异的 30.6%,反映了蜚蠊目甲螨亚目、中气门亚目,弹尾目棘跳科、长角跳科等土壤动物优势类群与蜘蛛目、啮目、原尾纲等稀有类群的差异,且这些优势类群在覆盖

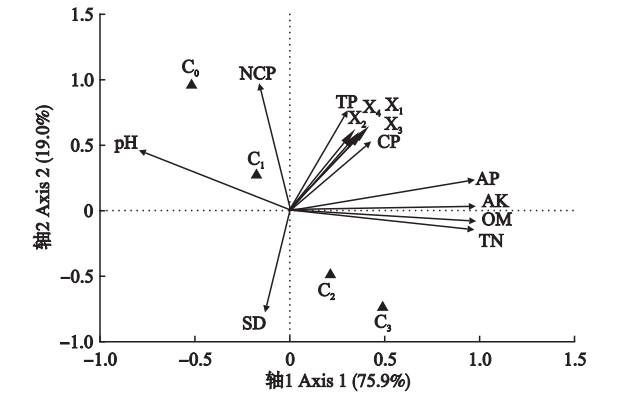


图 3 不同覆盖处理下土壤理化性质冗余分析  
Fig.3 Redundancy analysis of soil physical and chemical properties under different mulching treatments.  
SD: 土壤容重 Soil bulk density; TP: 总孔隙度 Total porosity; CP: 毛管孔隙 Capillary porosity; NCP: 非毛管孔隙 Non-capillary porosity; OM: 有机质 Organic matter; TN: 全氮 Total N; AP: 有效磷 Available P; AK: 速效钾 Available K.

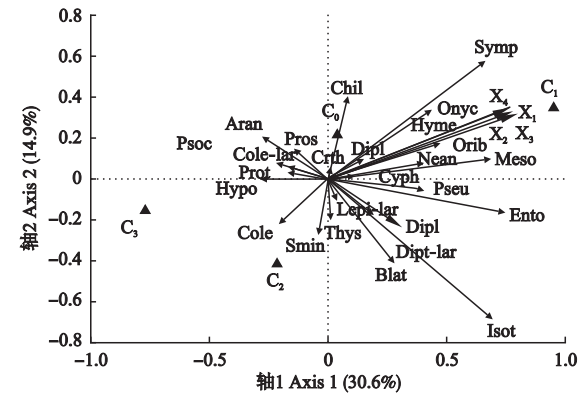


图4 不同覆盖处理下土壤动物冗余分析

**Fig.4** Redundancy analysis of soil fauna under different mulching treatments.

Symp: 综合纲 Symphyla; Chil: 唇足纲 Chilopoda; Dipl: 倍足纲 Diplopoda; Dipl: 双尾纲 Diplura; Prot: 原尾纲 Protura; Hyme: 膜翅目 Hymenoptera; Aran: 蜘蛛目 Araneae; Pseu: 伪蝎目 Pseudoscorpiones; Orth: 直翅目 Orthoptera; Blat: 蜚蠊目 Blattellidae; Cole: 鞘翅目 Coleoptera; Thys: 缨翅目 Thysanoptera; Psoc: 啮目 Psocoptera; Orib: 甲螨亚目 Oribatida; Meso: 中气门亚目 Mesostigmata; Pros: 前气门亚目 Prostigmata; Onyc: 棘跳科 Onychiuridae; Smin: 圆跳科 Sminthuridae; Hypo: 球角跳科 Hypogastruridae; Nean: 疣跳科 Neanidae; Cyph: 驼跳科 Cyphoderidae; Ento: 长角跳科 Entomobryidae; Isot: 等节跳科 Isotomidae; Dipt-lar: 双翅目幼虫 Diptera larvae; Cole-lar: 鞘翅目幼虫 Coleoptera larvae; Lepi-lar: 鳞翅目幼虫 Lepidoptera larvae.

1 次的毛竹林中分布相对较多.第 2 轴解释变异的 14.9%,主要反映唇足纲、直翅目、鳞翅目幼虫、缨翅目、弹尾目圆跳科等土壤动物间的差异.弹尾目等节跳科和第 1、2 轴均存在一定相关性,说明其对环境的适应性较强,分布范围相对更广.由图 4 可知,土壤的入渗特征与蜚蠊目中甲螨亚目、中气门亚目,弹尾目中棘跳科、长角跳科、疣跳科、驼跳科等土壤动物存在正相关关系.此外,综合纲、唇足纲、倍足纲、膜翅目、伪蝎目等大中型节肢动物在土壤中的活动也会对土壤渗透性产生一定影响.

3 讨 论

3.1 土壤入渗特征与土壤理化性质

土壤入渗能力很大程度上受到土壤物理化学性质的影响,研究表明,土壤的入渗特征与土壤容重呈负相关,与总孔隙度、土壤有机质呈正相关<sup>[4-5,21]</sup>.有机物料的添加往往会改变土壤原有的理化性质,进而使土壤的入渗能力发生变化.庞党伟等<sup>[22]</sup>发现,连续耕作下,玉米秸秆不还田使土壤容重增加、孔隙度降低,而通过玉米秸秆还田措施,有利于增加土壤有机质、孔隙度,降低土壤容重.孙文泰等<sup>[23]</sup>发现,土壤覆盖麦草后可有效降低土壤容重,提高土壤孔隙度和含水量.此外,土壤中施入秸秆,还可以改变

土壤的孔隙结构,增加结构孔隙,促进土壤非毛管孔隙的发育,使土壤原有孔隙向更大孔隙发展,而非毛管孔隙的增加有利于土壤水分入渗<sup>[24]</sup>.

本研究表明,与未覆盖对照相比,毛竹林地初次覆盖秸秆和砻糠后,非毛管孔隙度、土壤全氮含量等指标显著提高,而土壤入渗特性也相对较好.这可能是由于秸秆和砻糠施用后增加了土壤有机碳库和养分含量,提高了土壤生物活性.郭子武等<sup>[25]</sup>发现,对雷竹林地短期覆盖 1 年后,由于有机覆盖物腐解和养分释放,土壤中微生物活性显著提高.有机质中的长链分子和土壤微生物菌丝均能有效束缚、黏结土壤矿物颗粒,促进土壤团聚结构形成发育<sup>[26-28]</sup>,进而改善土壤入渗特性.随着覆盖次数的增加,连续覆盖 4~6 年后,毛竹林土壤中尽管有机碳、全氮、有效磷、速效钾等含量显著提高,但土壤物理性状发生劣变,土壤容重提高、总孔隙度下降,土壤渗透性能变差,这可能是由土壤 pH 降低而引起的土壤板结造成的.毛竹林覆盖利用潮湿的秸秆发酵来提高地温,促进笋芽分化和冬笋提早萌发.连续多次覆盖给土壤带入大量有机物料和养分元素,林地有机物料的积累和不完全腐解会使土壤生物活性物质含量发生变化,降低酶活性并积累酚酸类物质,而林地土壤氮的大量积累也会引发硝化作用,进而导致土壤酸化<sup>[29-30]</sup>.李子川等<sup>[31]</sup>也发现,随着覆盖时间延长,雷竹林表层和亚表层土壤 pH 值下降趋势显著,并促进了生理毒性铝释放,增加了林地发生铝毒胁迫的风险.

3.2 土壤入渗特征与根长密度

根系是植物吸收土壤水分和养分的重要器官,与土壤性质关系密切,其密度与分布特征对林地的水分分配及水土保持均有一定影响<sup>[32-36]</sup>.根长密度是单位体积土壤所含根系长度,反映了根系在土壤中延伸、穿插、交织的程度<sup>[37]</sup>.研究表明,根长密度与有机质、全氮含量呈正相关,与土壤容重呈负相关<sup>[23,38]</sup>,说明适量增加土壤有机质、全氮含量,降低土壤容重,有利于土壤根系的生长.而根长密度的增加有利于土壤入渗,因为根系在土壤中产生横向、纵向的根孔(生物大孔隙),形成连通网络<sup>[39-41]</sup>.入渗初期水分优先沿这些大孔隙运输<sup>[42]</sup>,可快速进入土壤深层,且大孔隙增多后,土粒遇水膨胀也不会对大孔隙体积产生较大的影响.由表 2、图 2 可知,未覆盖林地、短期覆盖林地的土壤根长密度较高,连续覆盖有机物料虽然增加了林地土壤的有机质、全氮含量,土壤根长密度却有所减小,这可能是因为土壤容重

提高、土壤 pH 降低对竹鞭和根系生长产生了抑制作用。李志勇等<sup>[43]</sup>也发现,在土壤环境酸化的情况下,马尾松细根会变得更加粗短,根尖膨大和根冠脱落的比例更大,几乎无分支,单位面积内的细根干质量、长度密度和根尖数等细根生长指标均有所下降。

植物根系直径大小对土壤渗透、抗冲作用等水力学特性均有一定影响。植物细根与土壤颗粒结合较紧密,网络固持土壤颗粒的能力强,抗冲保土能力较好。根系直径小,则寿命短、周转快<sup>[44]</sup>,这些细根衰老死亡后转化的有机质会促进土壤团聚体形成<sup>[45]</sup>,改善土壤理化性质,并减少土壤入渗时溃散土粒对土壤孔隙的堵塞。李勇等<sup>[46]</sup>发现,直径 $\leq 1$  mm 的刺槐林细根能显著影响土壤物理性质;刘道平等<sup>[47]</sup>发现,土壤渗透性分别与直径 $<0.5$  mm、直径 $0.5\sim 1.0$  mm 的植物根长关系密切。但也有研究认为,对土壤有机质、土壤全氮贡献较大的是径级 $1.0\sim 2.0$  mm 的根系,而径级 $\leq 1.0$  mm 根系的作用并不显著<sup>[38]</sup>。本研究表明,土壤入渗特征与径级 $0.5\sim 5.0$  mm 的根长密度均存在正相关,而与径级为 $<0.5$  mm 和 $>5$  mm 的根系相关性较弱。这说明在毛竹林中不仅 $\leq 2.0$  mm 细根会影响土壤入渗, $2.0\sim 5.0$  mm 的粗根也会通过产生较大的根孔等方式增强水分入渗。这与前人研究结论一致,李建兴等<sup>[48]</sup>也发现,紫花苜蓿、狗牙根等护坡植物根系对土壤渗透性的增强作用主要归功于 $0.5\sim 5.0$  mm 径级的根系,且当根系径级过大或过小时对土壤入渗的贡献会有所减弱。

### 3.3 土壤入渗特性与土壤动物

土壤动物对其长期生存的环境具有适应性,且敏感性强,活动能力强,可以及时对土壤环境及土壤质量发生的变化做出响应。因此,常将土壤动物的群落特征作为衡量土壤立地衰退的重要指示因子。由图 4 可知,土壤入渗特征与蜚蠊目的甲螨亚目和中气门亚目,弹尾目中棘跳科、长角跳科、疣跳科、驼跳科等小型节肢动物及综合纲、唇足纲、倍足纲、膜翅目、伪蝎目等大中型节肢动物的密度均存在一定正相关的关系。说明这些土壤动物的存在有利于土壤水分的渗透。研究发现,土壤动物是形成土壤大孔隙的重要因素,土壤动物会活动至地表取食新鲜有机物质,还会在土壤中挖掘、筑穴,这些行为都可以改变土壤通透性,进而影响土壤水分入渗<sup>[49-50]</sup>。

毛竹林短期覆盖有机物料后,土壤动物分布密度出现增加。这可能是因为秸秆等有机物增加及土

壤结构的改善,为土壤动物提供了充足食物和良好的栖息环境。此外,土壤全氮等养分含量的增加还会提高土壤微生物生物量,而许多土壤动物以微生物为食物来源,并通过取食微生物,进一步提高微生物的生物量和活性<sup>[51-52]</sup>。靳士科等<sup>[53]</sup>认为,土壤有机质、土壤全氮等是影响城市森林中小型土壤动物群落结构的主要环境因子,蜚蠊目和线蚓科等均与土壤有机质和全氮呈正相关。而林英华等<sup>[54]</sup>对黄土区农田的研究也发现,施肥过程中加入秸秆更有利于农田土壤动物种群的生存发展。但本研究中,多次覆盖后,毛竹林的土壤动物,特别是弹尾目和蜚蠊目等腐食性动物密度显著降低,弹尾目和蜚蠊目是土壤动物中主要优势类群<sup>[55-59]</sup>,二者数量及比例关系反映了土壤性质稳定性及受干扰程度。研究发现,蜚蠊目、弹尾目等土壤动物分布、活动和生境条件密切相关,与土壤 pH 呈正相关,而与土壤容重呈负相关<sup>[6,60]</sup>,说明连续覆盖后土壤性状劣变,土壤容重提高,土壤 pH 与孔隙性降低是土壤动物密度下降的重要原因。等节跳科是弹尾目的重要类群,其密度分布受土壤有机质、养分含量影响较大<sup>[60]</sup>,尽管 $2\sim 3$ 次覆盖后土壤容重和 pH 的变化不利于土壤动物的活动,但覆盖产生的大量有机质和养分使等节跳科动物在林地中仍保持了较强的适应性,有一定数量的分布,因此与入渗特征相关关系较弱。

### 参考文献

- [1] Liu Z-Q (刘芝芹), Huang X-H (黄新会), Wang K-Q (王克勤), et al. Soil infiltration characteristics and its influencing factors of different forest soils in Jinshajiang dry-hot valley region. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2014, **28**(2): 57-62 (in Chinese)
- [2] Zhang C-S (张昌顺), Fan S-H (范少辉), Guan F-Y (官凤英), et al. Soil infiltration characteristics and its influencing factors under *Phyllostachys edulis* forests in Northern Fujian Province. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2009, **45**(1): 36-42 (in Chinese)
- [3] Yan D-F (闫东锋), Wang D-C (王德彩), Yang X-T (杨喜田). Effects of surface root system on soil infiltration at different vegetation types in Danjiangkou Reservoir area. *Science of Soil and Water Conservation* (中国水土保持科学), 2016, **14**(3): 35-44 (in Chinese)
- [4] Lin D-J (林代杰), Zheng Z-C (郑子成), Zhang X-Z (张锡洲), et al. Characteristic and influencing factors of soil infiltration of different land use patterns. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2010, **24**(1): 33-36 (in Chinese)
- [5] Wang J-J (王纪杰), Yu Y-C (俞元春), Chen R (陈容), et al. Soil infiltration characteristics of eucalyptus



- plantation with different rotations and ages. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2011, **25**(2): 78–82 (in Chinese)
- [6] Wang Y-K (王意锟), Jin A-W (金爱武), Zhu Q-G (朱强根), *et al.* Characteristics of soil fauna community of *Phyllostachys edulis* forests with different management intensity. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 2015, **43**(1): 100–102 (in Chinese)
- [7] Chen S-L (陈双林). Thoughts on related problems of mulched technique with organic materials in moso bamboo forest for early shooting. *Journal of Zhejiang Agriculture and Forest University* (浙江农林大学学报), 2011, **28**(5): 799–804 (in Chinese)
- [8] Fan S-H (范少辉), Liu G-L (刘广路), Qi L-H (漆良华), *et al.* Soil infiltration characteristics of *Phyllostachys pubescens* forests with different operating time in Northwest Fujian. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2010, **24**(1): 24–48 (in Chinese)
- [9] Lu R-K (鲁如坤). Soil and Agricultural Chemistry Analysis. Beijing: China Agriculture Press, 1999 (in Chinese)
- [10] Yin W-Y (尹文英). Pictorial Keys to Soil Animals of China. Beijing: Science Press, 1998 (in Chinese)
- [11] Yin W-Y (尹文英). Subtropical Soil Animals of China. Beijing: Science Press, 1992 (in Chinese)
- [12] Zhu X, Zhu B. Diversity and abundance of soil fauna as influenced by long-term fertilization in cropland of purple soil, China. *Soil and Tillage Research*, 2015, **146**: 39–46
- [13] Li X, Yin X, Wang Z, *et al.* Litter mass loss and nutrient release influenced by soil fauna of *Betula ermanii* forest floor of the Changbai Mountains, China. *Applied Soil Ecology*, 2015, **95**: 15–22
- [14] Domene X, Hanley K, Enders A, *et al.* Short-term mesofauna responses to soil additions of corn stover biochar and the role of microbial biomass. *Applied Soil Ecology*, 2015, **89**: 10–17
- [15] Wang Z, Yin X, Li X. Soil mesofauna effects on litter decomposition in the coniferous forest of the Changbai Mountains, China. *Applied Soil Ecology*, 2015, **92**: 64–71
- [16] Liu RT, Zhao HL, Zhao XY. Changes in soil macrofaunal community composition under selective afforestation in shifting sand lands in Horqin of Inner Mongolia, northern China. *Ecological Research*, 2013, **28**: 1–8
- [17] Buch AC, Correia MEF, Teixeira DC, *et al.* Characterization of soil fauna under the influence of mercury atmospheric deposition in Atlantic Forest, Rio de Janeiro, Brazil. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, **32**: 217–227
- [18] Huang Y-M (黄玉梅), Zhang J (张健), Yang W-Q (杨万勤). The characteristics of soil animal community structure in *Eucalyptus grandis* plantation. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2006, **26**(8): 2502–2509 (in Chinese)
- [19] Lin Y-H (林英华), Song B-M (宋百敏), Han Q (韩茜), *et al.* The community diversity of ground-dwelling soil animals in abandoned quarry in Mentougou, Beijing. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2007, **27**(11): 4833–4839 (in Chinese)
- [20] Wu H-T (武海涛), Lyu X-G (吕宪国), Yang Q (杨青), *et al.* Ecological characteristics and functions of soil fauna community. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2006, **43**(2): 314–323 (in Chinese)
- [21] Li W-F (李文凤), Zhang X-P (张晓平), Liang A-Z (梁爱珍), *et al.* Characters of infiltration and preferential flow of black soil in Northeast China under different tillage patterns. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(7): 1506–1510 (in Chinese)
- [22] Pang D-W (庞党伟), Chen J (陈金), Tang Y-H (唐玉海), *et al.* Effect of returning methods of maize straw and nitrogen treatments on soil physicochemical property and yield of winter wheat. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2016, **42**(11): 1689–1699 (in Chinese)
- [23] Sun W-T (孙文泰), Liu X-L (刘兴禄), Dong T (董铁), *et al.* Root distribution, soil characteristics and fruit quality affected by different mulching measures in apple orchard in the dry area of eastern Gansu. *Journal of Fruit Science* (果树学报), 2015, **32**(5): 841–851 (in Chinese)
- [24] Ding D-Y (丁奠元), Feng H (冯浩), Zhao Y (赵英), *et al.* Effect of ammoniated straw returning on soil pore structure. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer* (植物营养与肥料学报), 2016, **22**(3): 650–658 (in Chinese)
- [25] Guo Z-W (郭子武), Yu W-X (俞文仙), Chen S-L (陈双林), *et al.* Influence of mulching management on soil microbe and its relationship with soil nutrient in *Phyllostachys praecox* stand. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2013, **33**(18): 5623–5630 (in Chinese)
- [26] Li J-X (李建兴), He B-H (何丙辉), Mei X-M (梅雪梅), *et al.* Effects of different planting modes on the soil permeability of sloping farmlands in purple soil area. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(3): 725–731 (in Chinese)
- [27] Liu J (刘洁), Li X-W (李贤伟), Ji Z-H (纪中华), *et al.* Soil water holding capacities and infiltration characteristics of three vegetation restoration models in dry-hot valley of Yuanmou. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2011, **31**(8): 2331–2340 (in Chinese)
- [28] Soane BD. The role of organic matter in soil compatibility: A review of some practical aspects. *Soil and Tillage Research*, 1990, **16**: 179–201
- [29] Sun X (孙晓), Zhuang S-Y (庄舜尧), Liu G-Q (刘国群), *et al.* Effect of Lei Bamboo plantation on soil basic properties under intensive cultivation management. *Soils* (土壤), 2009, **41**(5): 784–789 (in Chinese)
- [30] Zheng R-H (郑仁红). Allelopathy of Cover Planting on Decline of *Phyllostachys praecox* Stand. Master Thesis.



- Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2006: 50–53 (in Chinese)
- [31] Li Z-C (李子川), Zhuang S-Y (庄舜尧), Gui R-Y (桂仁意), *et al.* Chemical properties and distribution of phytotoxic Al species in intensively cultivated soils of *Phyllostachys praecox* stands. *Journal of Zhejiang Agriculture and Forestry University* (浙江农林大学学报), 2011, **28**(6): 837–844 (in Chinese)
- [32] McCulley RL, Jobbágy EG, Pockman WT, *et al.* Nutrient uptake as a contributing explanation for deep rooting in arid and semi-arid ecosystems. *Oecologia*, 2004, **141**: 620–628
- [33] Gordon WS, Jackson RB. Nutrient concentrations in fine roots. *Ecology*, 2000, **81**: 275–280
- [34] Osman N, Barakbah SS. Parameters to predict slope stability-soil water and root profiles. *Ecological Engineering*, 2006, **28**: 90–95
- [35] Mamo M, Bubenzer GD. Detachment rate, soil erodibility, and soil strength as influenced by living plant roots. I. Laboratory study. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 2001, **44**: 1167–1174
- [36] Wells CE, Glenn DM, Eissenstat DM. Changes in the risk of fine-root mortality with age: A case study in peach, *Prunus persica* (Rosaceae). *American Journal of Botany*, 2002, **89**: 79–87
- [37] Wang G-L (王国梁), Liu G-B (刘国彬). Effect of *Stipa bungeana* communities on soil infiltration in soil profile in loess hilly region. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2009, **23**(3): 227–231 (in Chinese)
- [38] Huang L (黄林), Wang F (王峰), Zhou L-J (周立江), *et al.* Root distribution in the different forest types and their relationship to soil properties. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2012, **32**(19): 6110–6119 (in Chinese)
- [39] Glab T. Impact of soil compaction on root development and yield of meadow-grass. *International Agrophysics*, 2013, **27**: 7–13
- [40] Shi ZJ, Xu LH, Wang YH, *et al.* Effect of rock fragments on macropores and water effluent in a forest soil in the stony mountains of the Loess Plateau, China. *African Journal of Biotechnology*, 2012, **11**: 9350–9361
- [41] Cannavo P, Michel JC. Peat particle size effects on spatial root distribution, and changes on hydraulic and aeration properties. *Scientia Horticulturae*, 2013, **151**: 11–21
- [42] Wang D-L (王大力), Yin C-Q (尹澄清). Functions of root channels in the soil system. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2000, **20**(5): 869–874 (in Chinese)
- [43] Li Z-Y (李志勇), Wang Y-H (王彦辉), Yu P-T (于澎涛), *et al.* A comparative study of resistance to soil acidification and growth of fine roots between pure stands of *Pinus massoniana* and *Cinnamomum camphora*. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2007, **27**(12): 5245–5252 (in Chinese)
- [44] Mei L (梅莉), Wang Z-Q (王政权), Cheng Y-H (程云环), *et al.* A review: Factors influencing fine root longevity in forest ecosystems. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2004, **28**(4): 704–710 (in Chinese)
- [45] Wu Y (吴彦), Liu S-Q (刘世全), Fu X-Q (付秀琴), *et al.* Study on improving soil's waterstable aggregates amounts by botanic roots. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation* (土壤侵蚀与水土保持学报), 1997, **3**(1): 45–49 (in Chinese)
- [46] Li Y (李勇), Wu S-X (武淑霞), Xiahou G-F (夏侯国风). Stabilization of soil structure by roots of artificial locust trees in purple soil region. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation* (土壤侵蚀与水土保持学报), 1998, **4**(2): 1–7 (in Chinese)
- [47] Liu D-P (刘道平), Chen S-X (陈三雄), Zhang J-C (张金池), *et al.* Soil infiltration characteristics under main vegetation types in Anji County of Zhejiang Province. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(3): 493–498 (in Chinese)
- [48] Li J-X (李建兴), He B-H (何丙辉), Chen Y (谌芸). Root features of typical herb plants for hillslope protection and their effects on soil infiltration. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2013, **33**(5): 1535–1544 (in Chinese)
- [49] Edwards WM, Norton LD, Redmond CE. Characterizing macropores that affect infiltration into nontilled soil. *Soil Science Society of America Journal*, 1988, **52**: 483–487
- [50] Brussaard L, Pulleman MM, Ouedraogo E, *et al.* Soil fauna and soil function in the fabric of the food web. *Pedobiologia*, 2007, **50**: 447–462
- [51] McGonigle TP. The significance of grazing on fungi in nutrient cycling. *Canadian Journal of Botany*, 1995, **73**: 1370–1376
- [52] Alpehi J, Bonkowski M, Scheu S. Protozoa, nematoda and lumbricidae in the rhizosphere of *Hordelymus europaeus* (Poaceae): Faunal interactions, response of microorganisms and effects on plant growth. *Oecologia*, 1996, **106**: 111–126
- [53] Jin S-K (靳士科), Wang J-J (王娟娟), Zhu S (朱莎), *et al.* Soil meso- and micro-fauna community structures in different urban forest types in Shanghai, China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2016, **27**(7): 2363–2371 (in Chinese)
- [54] Lin Y-H (林英华), Yang X-Y (杨学云), Zhang F-D (张夫道), *et al.* Effect of long-term fertilization on cropland soil fauna community in loess soil, Shanxi, China. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2005, **38**(6): 1213–1218 (in Chinese)
- [55] Filser J, Mebes KH, Winter K, *et al.* Long-term dynamics and interrelationships of soil Collembola and microorganisms in an arable landscape following land use change. *Geoderma*, 2002, **105**: 201–222
- [56] Cicconardi F, Fanciulli PP, Emerson BC. Collembola, the biological species concept and the underestimation of global species richness. *Molecular Ecology*, 2013, **22**: 5382–5396
- [57] A'Bear AD, Boddy L, Jones TH. Bottom-up determination of soil collembola diversity and population dynamics

in response to interactive climatic factors. *Oecologia*, 2013, **173**: 1083–1087

[58] John MG St, Wall DH, Behan-Pelletier VM. Does plant species co-occurrence influence soil mite diversity? *Ecology*, 2006, **87**: 625–633

[59] Nielsen UN, Osler GHR, Campbell CD, *et al.* The influence of vegetation type, soil properties and precipitation on the composition of soil mite and microbial communities at the landscape scale. *Journal of Biogeography*, 2010, **37**: 1317–1328

[60] Li W (李 伟), Cui L-J (崔丽娟), Wang X-W (王

小文), *et al.* Relationship between soil animal community structure and soil physical and chemical properties in Lake Taihu Lakeshore, China. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2013, **49**(7): 106–113 (in Chinese)

---

**作者简介** 王意锬, 男, 1984 年生, 讲师, 博士研究生. 主要从事竹林生态栽培和土壤环境修复研究. E-mail: wykknjfu@163.com

**责任编辑** 孙 菊

---