

## 天童常绿阔叶林砍伐后凋落物层跳虫群落生态学研究

靳亚丽<sup>1</sup>, 蒋跃<sup>2</sup> (1. 上海自然博物馆自然史研究中心, 上海科技馆, 上海 200127; 2. 华东师范大学生态与环境科学学院, 上海 200062)

**摘要** [目的]了解不同砍伐处理对常绿阔叶林凋落物层跳虫群落结构的影响以及各处理样地跳虫群落恢复状况。[方法]于2009年12月至2010年9月在浙江天童地区常绿阔叶林5个砍伐7年后的恢复样地进行四季采样,对浙江森林公园不同砍伐处理下常绿阔叶林土壤动物优势类群跳虫群落进行调查。样地处理分别为:(I)去除大树保留萌枝、(II)去除地表植物保留枯枝落叶层、(III)去除地表植物和10 cm表土、(IV)清除下木层保留大树、(V)对照。[结果]各处理样地各科跳虫类群组成相差不大,密度从大到小依次为II号样地(28.79%)、IV号样地(21.03%)、I号样地(20.75%)、V号样地(17.09%)、III号样地(12.33%),表现为适度地干扰处理能够让跳虫保持较高密度。不同季节跳虫群落组成不同,且跳虫密度在不同样地季节变化存在差异,总体上夏秋季明显高于春冬季。不同砍伐程度下,各样地凋落物有机碳、总氮和总磷均存在显著差异,随着砍伐程度的加剧,凋落物有机碳和总氮含量逐渐降低。结合不同砍伐程度处理中跳虫群落密度,虽然各处理样地经过了7年的恢复,但不同处理间跳虫群落差异仍较为明显。[结论]跳虫群落对环境变化非常敏感,可作为评价土壤环境受干扰程度的指示种。

**关键词** 干扰;跳虫;凋落物层;常绿阔叶林;天童

**中图分类号** Q958.1 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2016)16-023-05

**Ecological Distribution of Collembola in the Litter under Different Ground Cover Treatment of Evergreen Broad-leaved Forest**

JIN Ya-li<sup>1</sup>, JIANG Yue<sup>2</sup> (1. Natural History Research Center of Shanghai Natural History Museum, Shanghai 200127; 2. School of Ecological and Environment Sciences, East China Normal University, Shanghai 200062)

**Abstract** [Objective] To understand the effects of ground cover removal on collembola communities in the litter and the community restoration situations. [Method] The collembola community investigation of 4 seasons in an evergreen broad-leaved forest after 7 years since the ground cover removal in Tiantong Region, Zhejiang Province was carried out during Dec. 2019-Sep. 2010. The five treatments in five sites were as follows: (I) big trees were removed but sprouts retained; (II) ground surface vegetation was removed but litter retained; (III) all vegetation and 0–10 cm topsoil were removed; (IV) undergrowth was removed but big trees retained; and (V) a control plot without any disturbance. [Result] The number of collembolan groups did not vary widely. The number of collembola community was as follows: II (28.79%) > IV (21.03%) > I (20.75%) > V (17.09%) > III (12.33%). The community composition vary in different seasons. The number of collembola community was as follows: autumn > summer > spring > winter. The organic carbon, total nitrogen and total phosphorus had obvious differences among the plots. Even after 7 years of restoration, the collembola community traits were obviously different among the treatments. [Conclusion] Collembola community was very sensitive to the environmental disturbing, which can be used as the indicator species to evaluate the soil environmental disturbance.

**Key words** Disturbance; Collembola; Litter layer; Evergreen broad-leaved forest; Tiantong

跳虫是天童森林生态系统凋落物层土壤动物中的优势类群,它们在自然界物质循环<sup>[1]</sup>、改善土壤理化特性、维护土壤生物群落稳定<sup>[2]</sup>以及指示环境变化<sup>[3]</sup>等方面有重要作用,尤其在落叶分解过程中<sup>[4]</sup>跳虫起着重要的辅助作用<sup>[5–6]</sup>。对于森林干扰,跳虫能够在密度和多样性等方面迅速做出反应<sup>[7–8]</sup>。森林砍伐是森林干扰的一种形式,对林地和周边地区的生态环境产生较大影响,直接影响森林生态系统的结构和演替过程<sup>[9]</sup>,从而影响其中的生物成分。陈小鸟等<sup>[10]</sup>在不同程度砍伐的影响下常绿阔叶林中的土壤动物群落特征的研究中发现土壤动物群落受砍伐的影响明显,且砍伐强度越大,其受影响越大。易兰等<sup>[11–12]</sup>于2003年9月至2004年10月对砍伐样地进行了砍伐前、砍伐后1月、砍伐后1年对这5个样地中的土壤动物群落进行了跟踪调查。陈小鸟<sup>[13]</sup>于2007年7月至2008年4月对以上砍伐样地凋落物层和土层的土壤动物进行了进一步跟踪调查。笔者对浙江国家森林公园不同砍伐处理下常绿阔叶林土壤动物优势类群跳虫群落进行了调查,探讨它们的群落特征及其对不同干扰强度的响应和恢复状况,旨在为不同干扰处理下跳虫的生

态学研究提供资料。

**1 材料与方法**

**1.1 研究区概况** 研究区位于浙江省鄞县东南部天童国家森林公园(121°47'E, 28°48'N),海拔260 m,坡度20°~30°,属于典型的亚热带季风气候,年平均温度为16.2℃,年平均降雨量为1 374.7 mm,年平均相对湿度达83%<sup>[14]</sup>。此次调查参考宋永昌等<sup>[14]</sup>2003年设置的5个20 m×20 m样地,其中样地I、II、III位于山路上方,样地间距为5 m,样地IV、V号位于山路下方,二者之间相距约100 m(图1)。2003年10月,模拟当地常见的人为干扰,对其中的4块样地进行了不同程度的采伐处理。5个样地采伐情况和经过6年恢复各样地优势植物如下:样地I优势植物有木荷(*Schima superba*)、米槠(*Castanopsis scarlesii*)、石栎(*Lithocarpus glaber*)、格药铃(*Euryamuricata*)、毛柄连蕊茶(*Camellia fraterna*)、老鼠矢(*Symplocos stellaris*)、山矾(*S. sumuntia*)、四川山矾(*S. setchuensis*)、海桐山矾(*S. heishanensis*)和窄基红褐铃(*Eurya rubiginosa* var. *attenuata*);样地II优势植物有木荷、米槠、茅栗(*Castanea seguinii*)、栲树(*Castanopsis fargesii*)、小叶青冈(*Cyclobalanopsis myrsinifolia*)、石栎、细叶青冈(*C. gracilis*)、杨梅(*Myrica rubra*)、格药铃和毛柄连蕊茶;样地III优势植物为木荷、米槠、细叶青冈、石栎、枫香(*Liquidambar formosana*)、苦槠(*Castanopsis sclerophylla*)、杨梅、老鼠矢、格药铃和栲树;样地IV优势

**基金项目** 高等学校博士学科点专项基金科研项目(20070269036);上海科技馆种子资金项目。

**作者简介** 靳亚丽(1985–),女,河北武安人,研究实习员,硕士,从事土壤动物生态学研究。

**收稿日期** 2016-04-23

植物有木荷、马尾松 (*Pinus massoniana*)、石栎、米槠、茅栗、细叶青冈、枫香、海桐山矾、苦槠和东南石栎;样地 V 优势植物有木荷、石栎、米槠、青冈、枫香、白栎 (*Quercus fabric*)、苦槠、老鼠矢、花榈木和格药枰。



图 1 样地设置示意

Fig. 1 The distribution of the experimental plots

**1.2 研究方法** 对 5 个样地进行四季采样,每个样地随机取 5 个点,样点之间相距 5 m 以上,每个点手捡 35 cm × 35 cm 方形样方凋落物于布袋中。采集的凋落物样品带回室内,采用 Tulltern 法分离 48 h<sup>[15]</sup>。

对分离得到的跳虫进行分类鉴定和数量统计,采用 Bellinger、Christiansen 和 Janssens 等共同修改的最新跳虫分类系统—“弹尾纲 4 目分类系统”进行分类<sup>[16]</sup>。

**1.3 数据处理** 参考宋永昌等<sup>[14]</sup>计算凋落物中跳虫群落相似性指数、多样性指数、均匀度、优势度和丰富度等。按照以下公式计算 Shannon - Wiener 多样性指数 ( $H'$ ):

$$H' = - \sum n_i / N \ln(n_i / N) \quad (1)$$

$$J_s = H' / \ln S \quad (2)$$

按照以下公式计算 Simpson 优势度指数 ( $C$ ):

$$C = \sum P_i^2, P_i = n_i / N \quad (3)$$

按照以下公式计算 Margalef 丰富度指数 ( $D$ ):

$$D = (S - 1) / \ln N \quad (4)$$

式中,  $n_i$  为第  $i$  个类群的个体数,  $N$  为群落中所有类群的个体数,  $S$  为类群数。

对跳虫与总氮、总磷和有机碳的关系进行了 Pearson 线性相关分析,各样地总氮、总磷和有机碳用 One - way ANOVA 进行差异显著性分析,使用 SPSS 19.0 统计软件完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同砍伐程度对跳虫群落的影响

**2.1.1 不同砍伐程度对跳虫群落结构的影响。**由表 1 可知,5 个样地 4 个季节共获得跳虫 11 191 只,隶属 4 目 11 科。优势类群(个体数占总数 > 10%)为等节蛱科 (Isotomidae)、长角蛱科 (Entomobryidae) 和疣蛱科 (Neanuridae),三者共占个体总数的 81.66%,等节蛱科最多,分别为长角蛱科的 2.39 倍、疣蛱科的 4.6 倍。常见类群(个体数占总数的 1% ~ 10%)有 5 科,各科个体数从多到少依次为棘蛱科 (Onychiuridae)、土蛱科 (Tullbergiidae)、球角蛱科 (Hypogastruridae)、卡天蛱科 (Katiannidae) 和鳞蛱科 (Tomoceridae),共占总捕获数量的 17.74%,其余为稀有类群(个体数占总数 < 1%)仅占总个体数的 0.60%。

随着砍伐程度的不同,跳虫群落的类群数和密度也发生

相应的变化,5 个样地跳虫的个体数从多到少依次为:II 号样地 (28.79%)、IV 号样地 (21.03%)、I 号样地 (20.75%)、V 号样地 (17.09%)、III 号样地 (12.33%)。类群数的变化与密度的变化趋势相同,II 号样地和 IV 号样地类群数最多,III 号样地类群数最少。

此外,不同砍伐程度下各科优势类群和常见类群并不完全相同,等节蛱科 (Isotomidae) 和长角蛱科 (Entomobryidae) 在 5 个样地中始终为优势类群,疣蛱科仅在 II 号样地和 V 号样地为优势类群,其余样地均为常见类群,棘蛱科在 III 号样地和 IV 号样地为常见类群,在其余 3 个样地均为优势类群。土蛱科、鳞蛱科、卡天蛱科和球角蛱科在 5 个样地均为常见类群。

**2.1.2 不同砍伐程度对跳虫群落多样性的影响。**运用 Shannon - Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度、Simpson 优势度指数和 Margalef 丰富度指数,对跳虫群落多样性的季节变化进行测度。从图 2 可以看出,清除地上植物、保留枯枝落叶的 II 号样地虽然密度最高,但其 Shannon - Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数却最低;作为对照的 V 号样地 Shannon - Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数最高,密度最低的 III 号样地(清除地上全部植物并清除枯枝落叶层和表层土)次之;II 号样地等节蛱科所占比例极大 (61.61%),因此其 Simpson 优势度指数最高;类群数最少的 III 号样地 Margalef 丰富度指数最低,各样地类群数从少到多依次为 III、I、V、II、IV。

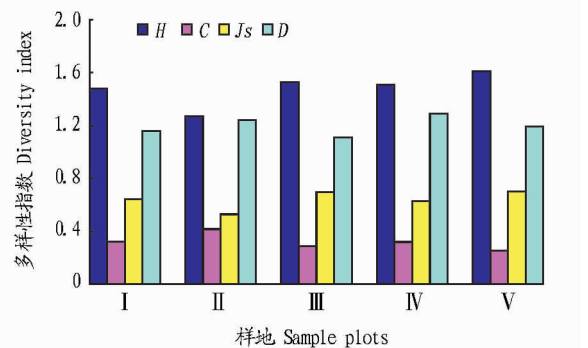


图 2 不同样地跳虫群落多样性比较

Fig. 2 Comparison of diversity of collembolan communities in different slashed plots

**2.2 各样地跳虫群落的季节变化** 从图 3 可以看出,跳虫群落类群组成的季节变化规律不明显,多数类群在四季均有出现,但密度却发生明显变化,跳虫群落总平均密度为  $8.80 \times 10^4$  ind./m<sup>2</sup>。秋季大量发生,占 40.45%;夏秋季节密度相近,冬季密度极少,仅占 4 季的 7.79%。

不同砍伐程度下跳虫群落的季节变化总体上可以分为 3 种类型:①秋季大量发生,主要有清除地上植物、保留枯枝落叶的 II 号样地 (44.91%) 和作为对照的 V 号样地 (61.20%);②夏季大量发生,主要有去除大树,保留萌枝的 I 号样地 (39.49%) 和清除下木层的 IV 号样地 (45.11%);③春、夏、秋三季密度相近,冬季密度最低,仅清除地表植物及表层 10 cm 土的 III 号样地表现出这种变化趋势 (图 4)。

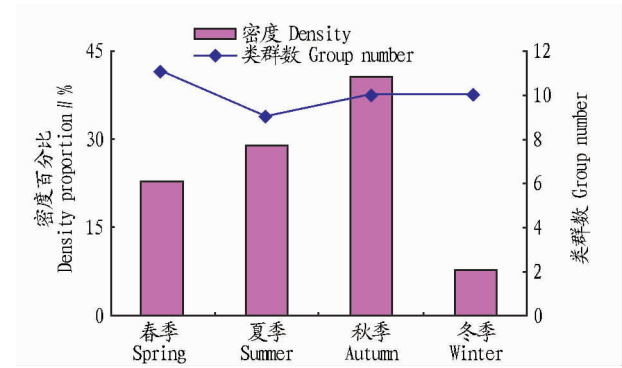


图 3 跳虫类群数与密度的季节变化

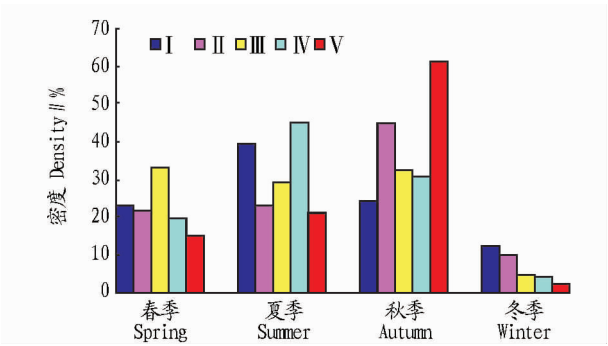


图 4 不同砍伐样地跳虫群落数量的季节变化

Fig.3 The seasonal changes of groups number and density of collembols

Fig.4 Seasonal fluctuation of collembolan density percentage at different treatment plots

表 1 不同砍伐程度跳虫类群及其密度

| 类群<br>Populations        | I                              |                        | II                             |                        | III                            |                        |
|--------------------------|--------------------------------|------------------------|--------------------------------|------------------------|--------------------------------|------------------------|
|                          | 密度 Density<br>个/m <sup>2</sup> | 百分比<br>Proportion<br>% | 密度 Density<br>个/m <sup>2</sup> | 百分比<br>Proportion<br>% | 密度 Density<br>个/m <sup>2</sup> | 百分比<br>Proportion<br>% |
| 等节蛭科 Isotomidae          | 9 784.27 ± 471.65              | 51.62                  | 16207.32 ± 423.84              | 61.61                  | 5 198.32 ± 172.08              | 46.14                  |
| 长角蛭科 Entomobryidae       | 2 993.80 ± 165.29              | 15.79                  | 4272.96 ± 355.60               | 16.24                  | 2 476.69 ± 171.54              | 21.98                  |
| 疣蛭科 Neanuridae           | 2 571.94 ± 164.39              | 13.57                  | 1592.16 ± 113.15               | 6.05                   | 1 537.72 ± 147.02              | 13.65                  |
| 棘蛭科 Onychiuridae         | 1 891.53 ± 69.96               | 9.98                   | 2517.51 ± 147.63               | 9.57                   | 1 007.00 ± 56.55               | 8.94                   |
| 土蛭科 Tullbergiidae        | 694.02 ± 39.42                 | 3.66                   | 653.19 ± 74.90                 | 2.48                   | 149.69 ± 14.27                 | 1.33                   |
| 球角蛭科 Hypogastruridae     | 381.03 ± 32.27                 | 2.01                   | 312.99 ± 12.23                 | 1.19                   | 340.20 ± 38.12                 | 3.02                   |
| 卡天蛭科 Katiannidae         | 381.03 ± 20.22                 | 2.01                   | 394.64 ± 15.56                 | 1.50                   | 367.42 ± 16.98                 | 3.26                   |
| 鳞蛭科 Tomoceridae          | 190.51 ± 12.58                 | 1.01                   | 190.51 ± 8.10                  | 0.72                   | 136.08 ± 4.39                  | 1.21                   |
| 圆蛭科 Sminthuridae         | 40.82 ± 3.26                   | 0.22                   | 108.87 ± 6.21                  | 0.41                   | 54.43 ± 3.93                   | 0.48                   |
| 伪圆蛭科 Dicyrtomidae        | 27.22 ± 3.40                   | 0.14                   | 27.22 ± 1.96                   | 0.10                   | 0                              | 0                      |
| 齿蛭科 Odontellidae         | —                              | 0.00                   | 27.22 ± 3.40                   | 0.10                   | —                              | 0                      |
| 总密度 Total density        | 18 956.17                      |                        | 26 304.58                      |                        | 11 267.56                      |                        |
| 占 5 个样地总密度 Proportion//% | 20.75                          |                        | 28.79                          |                        | 12.33                          |                        |
| 类群数 Group number         | 10.00                          |                        | 11.00                          |                        | 9.00                           |                        |

| 类群<br>Populations        | IV                             |                        | V                              |                        | 占总密度//% | 多度<br>Abundance |
|--------------------------|--------------------------------|------------------------|--------------------------------|------------------------|---------|-----------------|
|                          | 密度 Density<br>个/m <sup>2</sup> | 百分比<br>Proportion<br>% | 密度 Density<br>个/m <sup>2</sup> | 百分比<br>Proportion<br>% |         |                 |
| 等节蛭科 Isotomidae          | 9 661.80 ± 716.38              | 50.28                  | 4 749.25 ± 218.77              | 30.43                  | 49.92   | +++             |
| 长角蛭科 Entomobryidae       | 3 674.20 ± 226.37              | 19.12                  | 5 688.21 ± 535.82              | 36.44                  | 20.91   | +++             |
| 疣蛭科 Neanuridae           | 2 789.67 ± 285.56              | 14.52                  | 1 401.64 ± 81.65               | 8.98                   | 10.83   | +++             |
| 棘蛭科 Onychiuridae         | 1 047.83 ± 52.51               | 5.45                   | 1 973.18 ± 141.38              | 12.64                  | 9.24    | ++              |
| 土蛭科 Tullbergiidae        | 666.80 ± 40.86                 | 3.47                   | 653.19 ± 81.65                 | 4.18                   | 3.08    | ++              |
| 球角蛭科 Hypogastruridae     | 639.58 ± 64.09                 | 3.33                   | 585.15 ± 34.18                 | 3.75                   | 2.47    | ++              |
| 卡天蛭科 Katiannidae         | 353.81 ± 30.99                 | 1.84                   | 258.56 ± 19.32                 | 1.66                   | 1.92    | ++              |
| 鳞蛭科 Tomoceridae          | 163.30 ± 7.35                  | 0.85                   | 258.56 ± 8.51                  | 1.66                   | 1.03    | ++              |
| 圆蛭科 Sminthuridae         | 95.26 ± 9.77                   | 0.50                   | 13.61 ± 1.96                   | 0.09                   | 0.34    | +               |
| 伪圆蛭科 Dicyrtomidae        | 81.65 ± 5.89                   | 0.42                   | 27.22 ± 1.70                   | 0.17                   | 0.18    | +               |
| 齿蛭科 Odontellidae         | 40.82 ± 5.10                   | 0.21                   | —                              | 0                      | 0.07    | +               |
| 总密度 Total density        | 19 214.73                      |                        | 15 608.56                      |                        |         |                 |
| 占 5 个样地总密度 Proportion//% | 21.03                          |                        | 17.09                          |                        |         |                 |
| 类群数 Group number         | 11.00                          |                        | 10.00                          |                        |         |                 |

由表 2 可知,不同砍伐程度下跳虫优势类群也发生季节性变化,各样地夏秋季节优势类群均为等节蛭科、长角蛭科

和棘蛭科,春冬季节优势类群主要为等节蛭科和疣蛭科,但不同砍伐程度下各样地又有季节性变化。等节蛭科在各个

样地 4 个季节中始终为优势类群,疣蛭科仅在春冬季节优势明显,棘蛭科和长角蛭科仅在夏秋季节优势明显,球角蛭科只在 IV、V 号样地的春季为优势类群,卡天蛭科只在 V 号样地的冬季为优势类群。

主要类群的季节消长导致了跳虫群落组成百分比的季节性变化。从图 5 可以看出,不同类群的数量季节消长不同。等节蛭科(Isotomidae)始终是四季的优势类群,等节蛭科的最高峰在夏季,占该类群全年总数的 35.66%,冬季密度最低,仅占 19.7%;而长角蛭科(Entomobryidae)在秋季大量发生,占该类群全年总数的 52.44%,春冬季节密度最低,分别占 7.42% 和 7.53%;疣蛭科(Neanuridae)和球角蛭科(Hypogastruridae)均是在春季密度最高,分别占该类群全年总数的 53.89% 和 66.55%,其次为冬季,夏秋季节密度相近且占全

年密度最低。卡天蛭科(Katiannidae)和鳞蛭科(Tomoceridae)棘蛭科(Onychiuridae)和土蛭科(Tullbergiidae)。

2.3 凋落物养分含量的变化及其与跳虫群落之间的关系 由表 3 可知,各样地有机碳、总氮和总磷均存在显著差异,其中有机碳和总氮含量从高到低均依次为:Ⅲ号样地、Ⅱ号样地、Ⅰ号样地、V 号样地、Ⅳ号样地;总磷含量在Ⅰ号样地最高(0.27),Ⅲ号样地最低(0.11),其余 3 个样地较接近。

由表 4 可知,多数类群跳虫与凋落物养分含量之间无显著相关性,只有土蛭科密度与总氮含量呈显著正相关( $r = -0.907, P < 0.05$ ),与总磷含量呈显著负相关( $r = -0.99, P < 0.01$ ),球角蛭科密度与有机碳含量呈显著正相关( $r = 0.969, P < 0.01$ )。

表 2 各样地优势类群的季节变化

Table 2 The seasonal change of dominant groups in each plot

| 样地<br>Sample plots | 春季 Spring          |                         |                         | 夏季 Summer          |                       |                     |
|--------------------|--------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------|-----------------------|---------------------|
|                    |                    |                         |                         |                    |                       |                     |
| I                  | 等节蛭科<br>Isotomidae | 疣蛭科<br>Neanuridae       |                         | 等节蛭科<br>Isotomidae | 长角蛭科<br>Entomobryidae | 棘蛭科<br>Onychiuridae |
| II                 | 等节蛭科<br>Isotomidae | 疣蛭科<br>Neanuridae       |                         | 等节蛭科<br>Isotomidae | 长角蛭科<br>Entomobryidae | 棘蛭科<br>Onychiuridae |
| III                | 等节蛭科<br>Isotomidae | 疣蛭科<br>Neanuridae       |                         | 等节蛭科<br>Isotomidae | 长角蛭科<br>Entomobryidae | 棘蛭科<br>Onychiuridae |
| IV                 | 疣蛭科<br>Neanuridae  | 球角蛭科<br>Hypogastruridae |                         | 等节蛭科<br>Isotomidae | 长角蛭科<br>Entomobryidae |                     |
| V                  | 等节蛭科<br>Isotomidae | 疣蛭科<br>Neanuridae       | 球角蛭科<br>Hypogastruridae | 等节蛭科<br>Isotomidae | 长角蛭科<br>Entomobryidae | 棘蛭科<br>Onychiuridae |

| 样地<br>Sample plots | 秋季 Autumn             |                       |                     | 冬季 Winter          |                    |                     |
|--------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
|                    |                       |                       |                     |                    |                    |                     |
| I                  | 等节蛭科<br>Isotomidae    | 长角蛭科<br>Entomobryidae | 棘蛭科<br>Onychiuridae | 疣蛭科<br>Neanuridae  | 等节蛭科<br>Isotomidae |                     |
| II                 | 等节蛭科<br>Isotomidae    | 长角蛭科<br>Entomobryidae | 棘蛭科<br>Onychiuridae | 等节蛭科<br>Isotomidae |                    |                     |
| III                | 长角蛭科<br>Entomobryidae | 等节蛭科<br>Isotomidae    | 棘蛭科<br>Onychiuridae | 等节蛭科<br>Isotomidae | 疣蛭科<br>Neanuridae  |                     |
| IV                 | 等节蛭科<br>Isotomidae    | 长角蛭科<br>Entomobryidae |                     | 等节蛭科<br>Isotomidae | 疣蛭科<br>Neanuridae  |                     |
| V                  | 长角蛭科<br>Entomobryidae | 等节蛭科<br>Isotomidae    | 棘蛭科<br>Onychiuridae | 等节蛭科<br>Isotomidae | 疣蛭科<br>Neanuridae  | 卡天蛭科<br>Katiannidae |

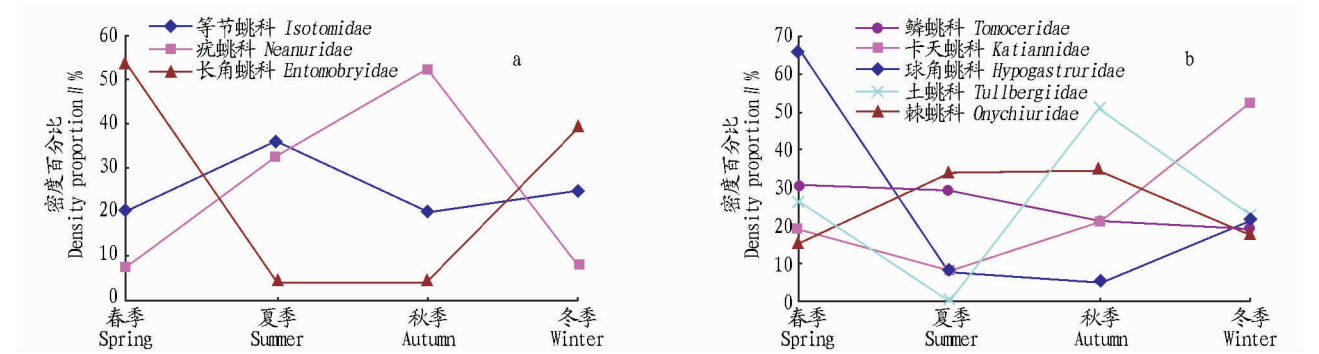


图 5 主要类群的季节变化  
Fig. 5 Seasonal changes of main collembolan groups

3 讨论与结论

森林中跳虫群落的组成和分布,一方面与森林立地和土

壤条件有关,另一方面受林内微环境的影响。森林的干扰不仅表现在植物群落多样性

表 3 不同砍伐程度下凋落物层养分含量的比较

| Table 3 Comparison of nutrient contents of litter layer under different felling levels |                                  |                           |                            | mg/g |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------|----------------------------|------|
| 样地<br>Sample plots                                                                     | 有机碳<br>Total organic carbon(TOC) | 总氮<br>Total nitrogen(TN)  | 总磷<br>Total phosphorus(TP) |      |
| I                                                                                      | 45.02 ± 12.67 <sup>ac</sup>      | 8.89 ± 2.68 <sup>a</sup>  | 0.27 ± 0.16 <sup>a</sup>   |      |
| II                                                                                     | 42.82 ± 6.01 <sup>ac</sup>       | 7.52 ± 1.36 <sup>ab</sup> | 0.19 ± 0.10 <sup>ab</sup>  |      |
| III                                                                                    | 38.78 ± 13.11 <sup>a</sup>       | 5.58 ± 2.51 <sup>b</sup>  | 0.11 ± 0.03 <sup>b</sup>   |      |
| IV                                                                                     | 65.35 ± 23.05 <sup>b</sup>       | 9.37 ± 1.45 <sup>a</sup>  | 0.19 ± 0.03 <sup>ab</sup>  |      |
| V                                                                                      | 56.64 ± 6.89 <sup>bc</sup>       | 8.67 ± 0.72 <sup>a</sup>  | 0.20 ± 0.03 <sup>ab</sup>  |      |

注：同列不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。  
Note: Different lowercases in the same column stand for significant difference( $P < 0.05$ ) .

表 4 主要类群密度与养分含量的相关系数

Table 4 Correlation coefficients of densities of main groups with nutrients contents

| 类群 Groups            | 有机碳<br>Total organic carbon (TOC) | 总氮<br>Total nitrogen (TN) | 总磷<br>Total phosphorus (TP) |
|----------------------|-----------------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| 等节蟧科 Isotomidae      | -0.807                            | 0.797                     | -0.410                      |
| 棘蟧科 Onychiuridae     | -0.679                            | 0.761                     | -0.304                      |
| 长角蟧科 Entomobryidae   | 0.416                             | 0.455                     | -0.248                      |
| 疣蟧科 Neanuridae       | 0.425                             | -0.249                    | -0.562                      |
| 土蟧科 Tullbergiidae    | -0.344                            | 0.034 *                   | -0.001 **                   |
| 鳞蟧科 Tomoceridae      | 0.599                             | 0.383                     | -0.249                      |
| 球角蟧科 Hypogastruridae | 0.007 *                           | 0.204                     | 0.485                       |

注：\* 表示相关性达到显著水平( $P < 0.05$ )；\*\* 表示相关性达到极显著水平( $P < 0.01$ )。  
Note: \* stands for significant correlation( $P < 0.05$ )；\*\* stands for extremely significant correlation ( $P < 0.01$ ) .

的变化,而且表现在森林生态环境的变化<sup>[17]</sup>。森林被砍伐后,原来复杂的植物群落结构发生改变,地表裸露程度增大,导致林内温湿度和光照等气候变化<sup>[18]</sup>,凋落物层微环境发生相应变化,这些变化对跳虫的栖息环境和食物源产生很大的影响,它直接作用于跳虫群落,从而导致凋落物层跳虫群落结构发生很大改变<sup>[19]</sup>。不同砍伐强度使各样地所受干扰程度不同,引起样地中植被恢复不同。该研究表明,虽然经过6年的恢复后,跳虫类群组成虽然相似,但优势类群、群落密度及多样性也有所差异。由此可见,跳虫群落对不同程度的林地砍伐处理较为敏感。

跳虫群落密度和丰富度最高值并非出现在未砍伐的V号样地,而是砍伐程度较轻的I、II、IV号样地较高,皆伐的III号样地密度和丰富度最低,这一现象出现的原因可能包括:适度的干扰会促进植物群落新旧更替,拥有较高的生物多样性,而伴随着样地不断的恢复更新,丰富的凋落物也为跳虫的生存和发展提供了充分的条件<sup>[10]</sup>。III号样地受干扰程度较大,不仅清除地上植物部分,且去除最适宜跳虫生存的10 cm 表层土,这在很大程度上改变了跳虫生存的微环境,即使经过6年的恢复,跳虫群落密度和丰富度仍较其他样地低。该研究表明,随着砍伐程度的加剧,跳虫群落类群组成减少,群落密度和丰富度也随之降低。由此可见,跳虫群落的结构变化可以在一定程度上反映森林受干扰程度,对于进一步揭示反映森林演替和干扰的土壤动物指示类群具有重要意义。

跳虫群落的变化主要表现在各样地不同季节所占的百分比差异和不同样地间优势类群的季节性差异。该研究表明,各样地四季中夏秋季节跳虫密度占比较高,冬春较低,这一结果与国内同类研究结果相似<sup>[20-21]</sup>。跳虫对温湿度变化比较敏感<sup>[22]</sup>,夏秋季丰富的凋落物和适宜的温湿度可能是跳虫密度偏高的主要原因。优势类群和常见类群的季节变化体现出不同类群跳虫对环境的适应性差异<sup>[23]</sup>,如四季温度变化、季节性降雨差异<sup>[24]</sup>等,此外,不同季节凋落物处在不同的分解阶段为跳虫提供了不同的食物源<sup>[5,25]</sup>,直接影响了跳虫群落结构的季节性变化。

该研究表明随着砍伐程度的加剧,凋落物有机碳和总氮含量呈减少趋势,I、II、III号样地的地表植物被完全清除或部分清除,地表凋落物含量较少,所以有机碳含量较低,尤其是III号样地凋落物含量极少,因此有机碳、总氮和总磷含量均最少。只清除下木层的IV号样地砍伐程度较弱,经过6年恢复后其凋落物储量已超过原有水平,因此有机碳和总氮含量最高。总磷含量虽然在不同砍伐程度下有显著差异,但没有明显的变化规律。

跳虫群落主要类群密度与养分含量的相关性分析表明,不同种类的跳虫其偏好的养分情况并不一致。由此推测,不同的跳虫类群偏好的主要食物可能存在差异,这也可能是众多跳虫类群能够在同一环境中共存的主要机理<sup>[26-27]</sup>。养分状况只能反映凋落物在样地间的含量差异,关于凋落物对具体某一类群跳虫的适口性和偏好性并不能在养分状况上得以明确体现<sup>[28]</sup>,这也是一部分跳虫类群与养分含量的关系并不显著的主要原因。

参考文献

[1] FILSER J. The role of Collembola in carbon and nitrogen cycling in soil [J]. Pedobiologia, 2002, 46: 234 - 245.  
[2] 陈建秀, 麻智春, 严海娟, 等. 跳虫在土壤生态系统中的作用[J]. 生物多样性, 2007(2): 154 - 161.  
[3] RUSEK J. Biodiversity of Collembola and their functional role in the ecosystem[J]. Biodiversity and conservation, 1998, 7: 1207 - 1219.  
[4] SINGH J S, GUPTA S R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems[J]. The botanical review, 1977, 43(4): 449 - 528.  
[5] 柯欣, 赵立军, 尹文英. 青冈林土壤跳虫群落结构在落叶分解过程中的变化[J]. 生态学报, 2001(6): 982 - 987.  
[6] 柯欣, 赵立军, 尹文英. 青冈林土壤动物群落结构在落叶分解过程中的演替变化[J]. 动物学研究, 1999(3): 48 - 54.  
[7] MALMSTRÖM A, PERSSON T, AHLSTRÖM K. Effects of fire intensity on survival and recovery of soil microarthropods after a clearcut burning[J]. Canadian journal of forest research, 2008, 38(9): 2465 - 2475.



km<sup>2</sup>。⑤裸露湖床面积明显减少,主要转出为盐碱地和裸地,转出面积分别为 1.16 和 7.94 km<sup>2</sup>。⑥裸地和盐碱地面积大幅减少,均以向草地和耕地转出为主。⑦沙地面积小幅增加,48.56 km<sup>2</sup> 裸地转化为沙地。⑧建设用地的面积增加明显,主要转入类型为裸地和草地,转入面积分别为 19.63 和 10.17 km<sup>2</sup>。

### 3 结论与讨论

(1)1990~2015 年,随着吐鲁番地区经济发展和人口增加,吐鲁番绿洲呈扩大趋势,绿洲植被覆盖面积增加,未利用地减少。主要以裸地和盐碱地向耕地、草地、园林地类型转移为主,耕地、草地、园林地面积增加显著,植被覆盖区面积合计增加 476.11 km<sup>2</sup>。裸地、盐碱地面积大幅减少,沙地面积小幅增加。耕地面积的持续增加反映出农业生产仍是吐鲁番绿洲重要的经济活动。

(2)吐鲁番地区建设用地大幅增加,城镇化进程显著。由 1990 年的 17.28 km<sup>2</sup> 增加到 2015 年的 42.29 km<sup>2</sup>,增幅为 144.73%,年变化率为 9.65%。

(3)绿洲内部水域面积增加,由 1990 年的 3.36 km<sup>2</sup> 增加到 2015 年的 8.30 km<sup>2</sup>,年变化率为 9.80%。而在绿洲外围吐鲁番盆地周边各河流的尾间湖—艾丁湖区裸露湖床面积大幅减少,从 1990 年的 75.86 km<sup>2</sup> 减少至 2015 年的 38.77 km<sup>2</sup>,减少了 48.89%。这说明绿洲用水量大幅增加,下游艾丁湖入湖水量严重减少,艾丁湖湖区面积萎缩,建议采取相

关措施加强湖区环境保护。

### 参考文献

- [1] 周锡钦,师华定,王秀茹,等. 蒙古高原近 30 年来土地利用变化时空特征与动因分析[J]. 浙江农业学报,2012(6):56-61.
- [2] 肖瑶,王艳慧,尹川. 北京城区近 20 年土地利用变化及其驱动力分析[J]. 测绘与空间地理信息,2013,36(7):29-32
- [3] 顾朝林. 北京土地利用/覆盖变化机制研究[J]. 自然资源学报,1994,14(4):307-312.
- [4] 宁岸新. 阿克苏市土地利用动态变化分析及驱动力研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学,2007.
- [5] 冉小伟,邓良基,潘根兴. 华东地区典型县域近 20 年土地利用动态变化分析[J]. 中国农学通报,2009,25(12):246-251
- [6] 吐鲁番地区地方志编纂委员会. 吐鲁番地区志[M]. 乌鲁木齐:新疆人民出版社,2004:20-22.
- [7] 钱乐祥. 遥感数字影像处理与地理特征提取[M]. 北京:科学出版社,2004:96-201.
- [8] 朱会义,李秀彬. 关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论[J]. 地理学报,2003(5):643-650.
- [9] 史培军,陈晋,潘耀忠. 深圳市土地利用变化机制分析[J]. 地理学报,2000(2):151-160.
- [10] 罗湘华,倪晋仁. 土地利用/土地覆盖变化研究进展[J]. 应用基础与工程科学学报,2000(3):262-272.
- [11] 陈百明. 试论中国土地利用和土地覆被变化及其人类驱动力研究[J]. 自然资源,1997(2):31-36.
- [12] 王秀兰. 土地利用/土地覆盖变化中的人口因素分析[J]. 资源科学,2000(3):39-42.
- [13] 王冰. 艾丁湖生态需水研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2015.
- [14] 杨发相,穆桂金,赵兴有. 艾丁湖萎缩与湖区环境变化分析[J]. 干旱区地理,1996(3):73-76.
- [15] 阿迪力·吐尔干. 基于 3S 技术的土地利用时空变化分析:以迪那河绿洲为例[J]. 水土保持研究,2015,22(1):305-309.
- [16] 柯欣,赵立军,尹文英. 青冈林土壤跳虫群落结构在落叶分解过程中的变化[J]. 生态学报,2001(6):982-987.
- [17] 吾玛尔·阿布力孜,阿布都如苏力·土逊,木卡热木·阿吉木,等. 乌鲁木齐地区不同生境下土壤跳虫群落结构及多样性研究[J]. 四川动物,2013,32(1):60-67.
- [18] 靳亚丽,由文辉,易兰,等. 天童森林生态系统凋落物层跳虫群落的生态学研究[J]. 生态环境学报,2011(2):241-247.
- [19] 刘晶,王云彪,吴东辉. 土壤跳虫适应低温环境的策略与机制研究进展[J]. 应用生态学报,2012(12):3526-3532.
- [20] NAKAMORI T, SUZUKI A. Spore-breaking capabilities of collembolans and their feeding habitat within sporocarps[J]. Pedobiologia, 2005, 49(3):261-267.
- [21] TURNBULL M S, LINDO Z. Combined effects of abiotic factors on Collembola communities reveal precipitation may act as a disturbance[J]. Soil biology and biochemistry, 2015, 82:36-43.
- [22] 董伟华,殷秀琴. 小兴安岭白桦林土壤跳虫的动态特征[J]. 生态学杂志,2005(3):278-282.
- [23] ITOH R. Growth and life cycle of an Arboreal Collembola, Xenylla brevispina Kinoshita, with special reference to its seasonal migration between tree and forest floor[J]. Edaphologia, 1991, 45:33-48.
- [24] NAKAMORI T, SUZUKI A. Spore-breaking capabilities of collembolans and their feeding habitat within sporocarps[J]. Pedobiologia, 2005, 49(3):261-267.
- [25] 易兰,由文辉. 天童植被演替过程中环境因子对土壤动物群落的影响[J]. 华东师范大学学报(自然科学版),2006(6):109-116.

(上接第 27 页)

- [8] CUCHTA P, MIKLISOVÁ D, KOVÁČ L'. A three-year study of soil Collembola communities in spruce forest stands of the High Tatras (Slovakia) after a catastrophic windthrow event[J]. European journal of soil biology, 2012, 50:151-158.
- [9] 陈利顶,傅伯杰. 干扰的类型、特征及其生态学意义[J]. 生态学报,2000(4):581-586.
- [10] 陈小鸟,由文辉,王向阳,等. 常绿阔叶林不同砍伐处理下土壤动物的群落特征[J]. 生物多样性,2009,17(2):160-167.
- [11] 易兰,由文辉,宋永昌. 天童常绿阔叶林与演替阶段凋落物中的土壤动物群落[J]. 生态学报,2005(3):466-473.
- [12] 易兰. 浙江天童受损常绿阔叶林的次生演替对土壤动物群落的影响[D]. 上海:华东师范大学,2005.
- [13] 陈小鸟. 天童常绿阔叶林不同砍伐程度对土壤动物群落的影响[D]. 华东师范大学,2009.
- [14] 宋永昌,陈小鸟. 中国东部常绿阔叶林生态系统退化机制与生态恢复[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [15] 忻介六. 土壤动物知识[M]. 北京:科学出版社,1986.
- [16] BELLINGER P, CHRISTIANSEN K, JANSSENS F. Checklist of the Collembola of the world[Z]. 2009.
- [17] BENGTTSSON J, NILSSON S G, FRANC A, et al. Biodiversity, disturbances, ecosystem function and management of European forests[J]. Forest Ecology and Management, 2000, 132:39-50.
- [18] 胡小飞,陈伏生,葛刚. 森林采伐对林地表层土壤主要特征及其生态过程的影响[J]. 土壤通报,2007,38(6):1213-1218.