

张 武,顾成林,杨文泉,等. 基于灰色关联分析松嫩平原耕作草甸区大型土壤动物与土壤因子的关系[J]. 江苏农业科学,2016,44(5):519-521. doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.05.148

# 基于灰色关联分析松嫩平原耕作草甸区大型土壤动物与土壤因子的关系

张 武,顾成林,杨文泉,刘方明,吴云飞,杨 帆,张倩男

(佳木斯大学,黑龙江佳木斯 154007)

**摘要:**运用灰色关联分析探讨黑龙江松嫩平原耕作草甸区大型土壤动物与土壤因子的关系。结果表明,含水量、地温对土壤动物的影响最大,土壤 pH 值的影响次之;全磷含量对大型土壤动物多样性指数影响最大;含水量、纬度是松嫩平原耕作草甸区大型土壤动物空间分布的限制性因子。

**关键词:**灰色关联分析;大型土壤动物;土壤因子;松嫩平原;耕作草甸区

**中图分类号:** S154.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)05-0519-03

大型土壤动物(体长 > 2 mm)个体大,种类繁多,数量巨大,是陆地生态系统重要的消费者和分解者,通过其自身生存、活动和摄食行为参与土壤有机质的分解和矿化<sup>[1-2]</sup>,促进土壤腐殖质的形成<sup>[3]</sup>,调节土壤酶和微生物活性<sup>[4]</sup>,改善土壤结构和质量<sup>[5]</sup>,调控地表植物群落的结构和功能<sup>[6-7]</sup>。此外,大型土壤动物对环境变化敏感,常作为反映环境变化的指示生物<sup>[8-10]</sup>,在土壤生态系统能量流动和物质循环中起重要的作用。目前,中外学者广泛关注大型土壤动物,对其研究主要集中在动物区系组成、数量变化、多样性、评价指标以及大型土壤动物与环境因素的相互关系等<sup>[11-13]</sup>,其中揭示土壤动物与环境因子相互关系的传统统计方法主要有相关分析、回归分析和主成分分析等。传统的统计分析方法存在需要的数据量大、样本须服从典型概率分布等弊端,而土壤动物与环境因子间又具有很强的模糊性和灰色性,样本不具备服从典型概率分布的条件。灰色系统理论中的关联度分析法克服了传统统计分析方法的缺陷,对样本数据量大小要求不高,样本也不需要服从典型的概率分布,用其分析事物之间的相互关系更具有广泛性和科学性。本研究以松嫩平原黑龙江省部分耕作草甸区大型土壤动物为研究对象,用灰色关联分析法揭示耕作草甸区大型土壤动物与土壤因子的关系,为松嫩平原耕作草甸区农田生态系统的可持续利用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江省西南部,属于松嫩平原,位置范围 45°50′~49°29′ N,125°14′46″~126°48′50″ E,是我国重要的农牧业生产基地,农业经营模式主要以种植业和畜牧业为主,玉米为研究区的代表性农作物。该区域为温带半湿润大陆性季风气候,年降水量 350~500 mm,无霜期 120~160 d。

### 1.2 取样和鉴定

2009 年 5 月、8 月、10 月,在研究区内沿北北西-南南东方向,按 1°纬度差分别在黑龙江省嫩江县、依安县、海伦市、绥化市、哈尔滨市呼兰区境内依次选取 5 个有代表性草甸黑土耕作区,对玉米田大型土壤动物群落进行调查。每个耕作区设 4 个采样点,每个采样点用自制的 20 cm × 20 cm × 5 cm 大型土壤动物采集器,按 0~5、5~10、10~15、15~20 cm 分 4 层取样,就地手拣分离大型土壤动物,保存于 75% 乙醇塑料瓶中带回实验室,参照文献<sup>[14]</sup>鉴定到科,某些种类只鉴定到目或纲<sup>[15]</sup>。

### 1.3 土壤理化性质分析

每个调查样地随机选取 4 点,每点纵向取 0~10 cm 层土样约 1 kg,均匀混合,带回实验室自然风干,并注意经常翻动;去除石块、植物根系、枯枝落叶等杂质,用土壤粉碎机粉碎;0.25 mm 网筛过筛,装瓶备用。分别采用烘干称量法、电位法、重铬酸钾-硫酸消化法、半微量凯氏定氮法、火焰光度法、SMT 法分析土壤含水量、pH 值、有机质含量、全氮含量、速效钾含量、全磷含量等理化指标;土壤温度用地温测定仪测定。

### 1.4 特征序列和因子序列的建立

选择大型土壤动物主要指标个体总量( $y_1$ )、类群总量( $y_2$ )、稀有类群个体数量( $y_3$ )、稀有类群数量( $y_4$ )、群落多样性指数( $y_5$ )、大型土壤动物优势类群和常见类群中的线蚓科(*Enchytraeidae*,  $y_6$ )、尖眼罩蚊科(*Sciidae*,  $y_7$ )、线虫纲(*Nematoda*,  $y_8$ )、蚊科(*Formicidae*,  $y_9$ )、隐翅甲科(*Staphylinidae*,  $y_{10}$ )作为母数列( $y$ );选择环境因子 pH 值( $x_1$ )、全氮含量( $x_2$ )、有机质含量( $x_3$ )、含水量( $x_4$ )、全磷含量( $x_5$ )、速效钾( $x_6$ )、地温因子( $x_7$ )为子数列( $x$ ),建立特征序列和因子序列。

### 1.5 数据处理

土壤动物与土壤因子的关系采用灰色关联的方法<sup>[16]</sup>分析,公式为:

$$\xi_{ij}(k) = \frac{\Delta(\min) + \rho \Delta(\max)}{\Delta_{ij}(k) + \rho \Delta(\max)}.$$

式中: $\Delta(\min)$ 、 $\Delta(\max)$ 分别为所比较的数列各个时刻绝对差中的最小值和最大值; $\rho$ 为分辨系数, $\rho \in [0, 1]$ ,取值多在

收稿日期:2015-04-02

基金项目:黑龙江省教育厅科学技术研究项目(编号:12541782)。

作者简介:张 武(1970—),男,黑龙江呼兰人,博士,副教授,主要从事土壤动物学与环境生态研究。E-mail:zw19700@126.com。

0.1~0.5 之间,本试验取值 0.5。原始数据无量纲化初始值,分别计算灰色关联系数( $r_{ij}$ )、灰色绝对关联度( $\varepsilon_{ij}$ )、灰色相对关联度( $\gamma_{ij}$ )以及综合关联度( $\rho$ )。灰色绝对关联度计算公式为:

$$\varepsilon_j = \frac{1 + |S_{sj}| + |t_{si}|}{1 + |S_{sj}| + |t_{si}| + |t_{sj} - S_{sj}|} \circ$$

式中: $|S_{sj}| = |\sum_{k=2}^{n-1} x_1^0(k) + \frac{1}{2}x_1^2(k)|$ ;  $|t_{sj}| = |\sum_{k=2}^{n-1} y_1^0(k) + \frac{1}{2}y_1^0(k)|$ 。

灰色相对关联度计算公式为:

$$\gamma_{ij} = \frac{1 + |S_{sj'}| + |t_{si'}|}{1 + |S_{sj'}| + |t_{si'}| + |t_{sj'} - S_{sj'}|} \circ$$

式中: $|S_{sj'}| = |\sum_{k=2}^{n-1} x_1^{0'}(k) + \frac{1}{2}x_1^{0'}(k)|$ ;  $|t_{sj'}| = |\sum_{k=2}^{n-1} y_1^{0'}(k) + \frac{1}{2}y_1^{0'}(k)|$ 。

表 1 各采样地的土壤理化性质

地区名称	pH 值	全氮含量 (%)	有机质含量 (%)	含水量 (%)	速效钾含量 (mg/kg)	全磷含量 (g/kg)	地温 (℃)
呼兰区	5.97	0.29	4.88	34.78	4.27	0.23	26.7
绥化市	6.42	0.30	4.79	35.26	5.18	0.21	25.6
海伦市	6.34	0.40	6.47	34.32	5.26	0.24	24.3
依安县	6.82	0.29	4.55	30.28	5.24	0.19	21.5
嫩江县	6.86	0.17	2.71	31.76	4.32	0.16	23.2

2.2 土壤动物群落与土壤因子的关联系数

由表 2 可见,群落个体总量的灰色关联系数从大到小依次为  $r_{41}(0.978\ 5) > r_{71}(0.933\ 2) > r_{11}(0.865\ 3) > r_{51}(0.853\ 7) > r_{31}(0.831\ 5) > r_{61}(0.756\ 2) > r_{21}(0.748\ 5)$ ; 类群总量的灰色关联系数从大到小依次为  $r_{42}(0.971\ 3) > r_{72}(0.948\ 8) > r_{12}(0.848\ 5) > r_{32}(0.845\ 8) > r_{52}(0.834\ 7) > r_{62}(0.757\ 9) > r_{22}(0.751\ 6)$ ; 稀有类群个体数量的灰色关联系数从大到小依次为  $r_{43}(0.989\ 5) > r_{73}(0.941\ 7) > r_{13}(0.857\ 1) > r_{33}(0.842\ 1) > r_{33}(0.823\ 2) > r_{23}(0.748\ 8) > r_{63}(0.746\ 4)$ ; 稀有类群数目的灰色关联系数从大到小依次为  $r_{44}(0.969\ 9) > r_{74}(0.934\ 7) > r_{14}(0.870\ 5) > r_{54}(0.856\ 3) > r_{34}(0.851\ 9) > r_{64}(0.771\ 4) > r_{24}(0.751\ 6)$ ; 群落多样性指数的灰色关联系数从大到小依次为  $r_{65}(0.941\ 7) > r_{15}(0.866\ 1) > r_{55}(0.829\ 5) > r_{35}(0.820\ 5) > r_{45}(0.734\ 3) > r_{75}(0.727\ 4) > r_{25}(0.718\ 3)$ ; 线蚓科的灰色关联系数从大到小依次为  $r_{76}(0.965\ 5) > r_{46}(0.925\ 0) > r_{36}(0.783\ 9) > r_{16}(0.777\ 8) > r_{26}(0.768\ 5) > r_{56}(0.767\ 8) > r_{66}(0.745\ 6)$ ; 尖眼覃蚊科的灰色关联系数从大到小依次为  $r_{47}(0.959\ 6) > r_{77}(0.947\ 9) > r_{57}(0.819\ 9) > r_{17}(0.819\ 2) > r_{37}(0.787\ 6) > r_{27}(0.750\ 8) > r_{67}(0.718\ 6)$ ; 线虫纲的灰色关联系数从大到小依次为  $r_{48}(0.986\ 4) > r_{78}(0.942\ 7) > r_{58}(0.842\ 1) > r_{18}(0.840\ 9) > r_{38}(0.808\ 5) > r_{28}(0.748\ 2) > r_{68}(0.737\ 1)$ ; 蚁科的灰色关联系数从大到小依次为  $r_{49}(0.961\ 5) > r_{79}(0.920\ 8) > r_{59}(0.868\ 4) > r_{19}(0.867\ 8) > r_{39}(0.836\ 4) > r_{69}(0.767\ 3) > r_{29}(0.748\ 1)$ ; 隐翅甲科的灰色关联系数从大到小依次为  $r_{4,10}(0.898\ 9) > r_{7,10}(0.887\ 6) > r_{2,10}(0.779\ 9) > r_{1,10}(0.764\ 9) > r_{3,10}(0.752\ 2) > r_{5,10}(0.750\ 8) > r_{6,10}(0.667\ 9)$ 。土壤因子关联度均值从大到小依次为含水

灰色综合关联度计算公式为:

$$\rho = \theta \varepsilon_{oi} + (1 - \theta) \gamma_{oi} \circ$$

式中: $\varepsilon_{oi}$ 为灰色绝对关联度; $\gamma_{oi}$ 为灰色相对关联度; $\theta \in [0, 1]$ ,试验取值 0.5。

2 结果与分析

2.1 采样地土壤的理化性状

由表 1 可见,松嫩平原耕作草甸区土壤均为偏酸性,5 个采样地的全氮含量、有机质含量、含水量、速效钾含量、全磷含量、低温分别在 0.17%~0.40%、2.71%~6.47%、30.28%~35.26%、4.27~5.26 mg/kg、0.16~0.24 g/kg、21.5~26.7℃,其中嫩江县土壤的全氮含量、有机质含量、全磷含量相对最低,海伦市土壤的全氮含量、有机质含量、速效钾含量、全磷含量相对最高,绥化市土壤的含水量相对最高,呼兰区土壤的地温相对最高,依安县土壤的含水量、地温相对最低。

量(0.937 5)、地温(0.915 0)、pH 值(0.837 8)、速效钾含量(0.826 5)、有机质含量(0.814 2)、全磷含量(0.761 0)、全氮含量(0.751 4);土壤动物群落关联度均值从大到小依次为群落稀有类群数量(0.858 0)、蚁科(0.852 9)、个体总量(0.852 4)、类群总量(0.851 2)、稀有类群个体数量(0.849 8)、线虫纲(0.843 7)、尖眼覃蚊科(0.829 1)、线蚓科(0.819 2)、群落多样性指数(0.805 4)、隐翅甲科(0.786 0)。

灰色关联度越大,子序列对母序列的影响越大。因此,含水量和地温对土壤动物群落的影响较大,群落稀有类群数量与环境因子关系最为密切,而尖眼覃蚊科、线蚓科、群落多样性指数、隐翅甲科密切程度相对较低。

2.3 土壤动物群落的其他关联排序

灰色相对关联度从大到小依次为  $\gamma_{4j}(0.950\ 2) > \gamma_{7j}(0.944\ 8) > \gamma_{1j}(0.862\ 2) > \gamma_{5j}(0.846\ 4) > \gamma_{3j}(0.822\ 8) > \gamma_{2j}(0.797\ 0) > \gamma_{6j}(0.772\ 3)$ ; 灰色绝对关联度从大到小依次为  $\varepsilon_{7j}(0.652\ 9) > \varepsilon_{4j}(0.644\ 4) > \varepsilon_{1j}(0.576\ 8) > \varepsilon_{3j}(0.556\ 1) > \varepsilon_{5j}(0.554\ 6) > \varepsilon_{6j}(0.552\ 0) > \varepsilon_{2j}(0.545\ 3)$ ; 灰色综合关联度从大到小依次为  $\rho_{7j}(0.798\ 8) > \rho_{4j}(0.797\ 3) > \rho_{1j}(0.719\ 5) > \rho_{5j}(0.700\ 5) > \rho_{3j}(0.689\ 4) > \rho_{2j}(0.671\ 2) > \rho_{6j}(0.662\ 2)$ 。灰色相对关联度中, $x_4$ 、 $x_7$ 是最优因子, $x_1$ 、 $x_5$ 次之, $x_6$ 最小;灰色绝对关联度中, $x_7$ 、 $x_4$ 是最优因子, $x_1$ 、 $x_3$ 次之, $x_2$ 最小;灰色综合关联度中, $x_7$ 、 $x_4$ 是最优因子, $x_1$ 、 $x_5$ 次之, $x_6$ 最小,这说明含水量、地温对土壤动物的影响相对较大,其次是 pH 值,最小是全磷。

3 结论与讨论

土壤动物对环境变化敏感,群落组成和结构年度变化相对稳定,一年中群落结构呈规律性季节变化。土壤动物类群

表 2 大型土壤动物与环境因子间的灰色关联系数

大型动物因子	土壤环境与大型动物因子的关联系数( $r_{ij}$ )							
	pH 值( $x_1$ )	全氮含量( $x_2, \%$ )	有机质含量( $x_3, \%$ )	含水量( $x_4, \%$ )	速效钾含量( $x_5, \text{mg/kg}$ )	全磷含量( $x_6, \text{g/kg}$ )	地温( $x_7, ^\circ\text{C}$ )	均值
个体总量( $y_1$ )	0.865 3	0.748 5	0.831 5	0.978 5	0.853 7	0.756 2	0.933 2	0.852 4
类群总量( $y_2$ )	0.848 5	0.751 6	0.845 8	0.971 3	0.834 7	0.757 9	0.948 8	0.851 2
稀有类群个体数量( $y_3$ )	0.857 1	0.748 8	0.823 2	0.989 5	0.842 1	0.746 4	0.941 7	0.849 8
稀有类群数量( $y_4$ )	0.870 5	0.751 6	0.851 9	0.969 9	0.856 3	0.771 4	0.934 7	0.858 0
群落多样性指数( $y_5$ )	0.866 1	0.718 3	0.820 5	0.734 3	0.829 5	0.941 7	0.727 4	0.805 4
线蚓科( $y_6$ )	0.777 8	0.768 5	0.783 9	0.925 0	0.767 8	0.745 6	0.965 5	0.819 2
尖眼罩蚊科( $y_7$ )	0.819 2	0.750 8	0.787 6	0.959 6	0.819 9	0.718 6	0.947 9	0.829 1
线虫纲( $y_8$ )	0.840 9	0.748 2	0.808 5	0.986 4	0.842 1	0.737 1	0.942 7	0.843 7
蚊科( $y_9$ )	0.867 8	0.748 1	0.836 4	0.961 5	0.868 4	0.767 3	0.920 8	0.852 9
隐翅甲科( $y_{10}$ )	0.764 9	0.779 9	0.752 2	0.898 9	0.750 8	0.667 9	0.887 6	0.786 0
均值	0.837 8	0.751 4	0.814 2	0.937 5	0.826 5	0.761 0	0.915 0	0.834 8

注: $i, j$  分别对应相应的列号、行号。

或群落组成在不同土壤生态系统中存在差异,能够反映环境的细微变化,如土壤湿度、温度、通气性、团粒结构、空隙数量、透水性和含水量等物理性变化以及 pH 值、钠含量、锰含量、氮含量、钾含量、碳含量、钙含量、碳氮比率、有机质含量等化学性变化。当某些环境因素变化超出阈值时,会影响到某些土壤动物的繁衍和生存,甚至导致其死亡。土壤动物的生态学特征与土壤环境因子的状态密切相关,土壤动物对土壤环境因子变化具有重要的指示作用。因此,土壤动物的量化指标可作为土壤环境因子变化的重要指标。

张一等对长白山红松阔叶混交林土壤水分含量、土壤温度对土壤动物活动规律的影响进行研究,结果表明,土壤温度和湿度是土壤动物分布的主要限制因子,土壤动物的种类和数量与土壤温度和湿度的变化呈正相关<sup>[17]</sup>。孙儒泳认为,土壤 pH 值是土壤动物分布的限制因素,多数土壤动物适宜在微酸性和近中性的土壤中生存<sup>[18]</sup>。张雪萍探讨了东部山地、农田灌溉区、东北羊草草原土壤动物与环境的关系,结果表明,在中性至碱性环境中,土壤动物密度与土壤 pH 值呈反相关关系<sup>[19]</sup>。本研究结果表明,含水量、地温和 pH 值对黑龙江省松嫩平原耕作草甸区大型土壤动物的 9 个特征影响最大,与张一等的结论<sup>[17-19]</sup>一致。

本研究区为黑龙江省西部地区,处于由半湿润向半干旱区的过渡地带,年降水量在 350~500 mm 之间,降水量偏少,因此,含水量是大型土壤动物空间分布规律的限制性因子。另外,取样是按照不同纬度进行的,纬度是影响温度的决定性因素,也决定地温的分布,而温度是大型土壤动物空间分布的另一个限制性因子,因此纬度因素也是大型土壤动物空间分布的一个重要限制因子。

参考文献:

[1] Gao M X, Li J K, Zhang X P. Responses of soil fauna structure and leaf litter decomposition to effective microorganism treatments in Da Hinggan Mountains, China[J]. Chinese Geographical Science, 2012, 22(6): 647-658.

[2] 李艳红, 杨万勤, 罗承德, 等. 桉-栎不同混合比例凋落物分解过程中土壤动物群落动态[J]. 生态学报, 2013, 33(1): 159-167.

[3] Salmon S, Artuso N, Frizzera L, et al. Relationships between soil

fauna communities and humus forms: response to forest dynamics and solar radiation[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(7): 1707-1715.

[4] 许华, 阮维斌, 高玉葆, 等. 根结线虫对黄瓜叶片氮磷含量、土壤 pH 和酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(8): 2038-2044.

[5] Jerry R L, Daniel G M, Grey W P, et al. Macroinvertebrate abundance, water chemistry, and wetland characteristics affect use of wetlands by avian species in Maine[J]. Hydrobiologia, 2006, 189: 143-167.

[6] de Deyn G B, Raaijmakers C E, Zoomer H R, et al. Soil invertebrate fauna enhances grassland succession and diversity[J]. Nature, 2003, 422: 711-713.

[7] Murray P J, Cook R, Currie A F, et al. Interactions between fertilizer addition, plants and the soil environment: implications for soil faunal structure and diversity[J]. Applied Soil Ecology, 2006, 33(2): 199-207.

[8] 王振海, 殷秀琴, 蒋云峰. 长白山苔原带土壤动物群落结构及多样性[J]. 生态学报, 2014, 34(3): 755-765.

[9] 刘继亮, 曹靖, 张晓阳, 等. 秦岭西部日本落叶松林大型土壤动物群落特征[J]. 应用与环境生物学报, 2013, 19(4): 611-617.

[10] 肖以华, 佟富春, 罗鑫华, 等. 冰雪灾后广东杨东山十二度水保护区森林大型土壤动物功能类群[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(7): 93-95.

[11] 吴鹏飞, 刘兴良, 刘世荣. 米亚罗林区冬季大型土壤动物空间分布特征[J]. 土壤学报, 2011, 48(3): 659-664.

[12] 谭波, 吴福忠, 杨万勤, 等. 川西亚高山/高山森林大型土壤动物群落多样性及其对季节性冻融的响应[J]. 生物多样性, 2012, 20(2): 215-223.

[13] 罗金明, 尹雄锐, 叶雅杰, 等. 大中型土壤动物对内陆盐沼沿退化序列环境的指示研究[J]. 草业学报, 2014, 23(2): 287-295.

[14] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴[M]. 北京: 科学出版社, 1998.

[15] 李佳欣, 林琳, 张雪萍. 松嫩平原耕作草甸土壤动物群落的区系组成和生态分布[J]. 中国农学通报, 2013, 29(5): 176-182.

[16] 刘思峰, 党耀国, 方志耕, 等. 灰色系统理论及应用[M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 2004.

[17] 张一, 陈鹏. 吉林省东部山地主要土壤类型及土壤动物[J]. 东北师大学报: 自然科学版, 1984(2): 83-92.

[18] 孙儒泳. 动物生态学原理[M]. 3 版. 北京: 北京师范大学出版社, 2001: 113.

[19] 张雪萍. 土壤动物与环境质量关系探讨[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 1995, 11(4): 95-99.