

应用土壤质量退化指数计算松嫩盐碱草地土壤营养位

王博文, 阎秀峰*

(东北林业大学生命科学学院, 东北林业大学林木遗传育种与生物技术教育部重点实验室, 哈尔滨 150040)

摘要: 土壤质量退化指数是一种定量评价土壤质量的方法, 以某一土壤类型为基准, 计算其他土壤类型与基准土壤类型之间各土壤属性的差异, 进而反应土壤质量退化或改善的程度。采用 1999 年的数据应用该方法评价土壤营养状况, 计算土壤营养位, 分析松嫩盐碱草地植被种群分布格局与土壤营养的关系, 从而探讨应用土壤质量退化指数计算土壤营养位的可行性。应用土壤质量退化指数评价土壤营养位得到的结果与主成分分析法的基本一致, 并且方法更为简便, 更利于土壤营养位分析在生产实践中应用。

关键词: 土壤质量退化指数; 土壤营养位; 盐碱草地

文章编号: 1000-0933(2009)02-0662-07 中图分类号: Q142, Q948 文献标识码: A

Apply soil quality degradation index to calculation soil nutrition field in Songnen alkaline grassland

WANG Bo-Wen, YAN Xiu-Feng*

Key Laboratory of Forest Tree Genetic Improvement and Biotechnology, Ministry of Education, College of Life Sciences, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(2): 0662 ~ 0668.

Abstract: To assess the relationship between plant population distribution and soil nutrition in Songnen alkaline grassland, soil nutrition field (SNF) was applied to calculate in process of principal component analysis (PCA). However, PCA require calculating again when new data input datasheet, this disadvantage limited it in field application. Consequently, it was necessary to produce a new approach in calculating SNF, which was able to reveal position of new data in axes of soil nutrition.

Soil quality degradation index (SQDI) was widely used to evaluate soil quality, which estimated the differences of soil properties between standard soil type and test-soil type. From this way, soil quality, i. e., degradation or improvement, was examined. In this paper, soil nutrition data of 1999 was applied to calculate both SQDI and SNF, to analyze the relationship between plant population distribution and soil nutrition in Songnen alkaline grassland, finally discuss it applicability and adaptability.

The standard soil type was sampled in soil where aboveground biomass of *Aneurolepidium chinense* was the highest in Songnen alkaline grassland, thirteen soil factors, such as organic materials, total N, total P, total K, total Na, total Ca, total Mg, total alkalinity ($\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$), soluble salt, K^+ and Na^+ contents, pH and as well as moisture, were used to calculate SQDI. The curve shapes of SQDI were similar to those of PCA, but the range of SNF calculated by SQDI was more extensively than that of PCA. In the result of PCA, the amount of soil factors reduced from thirteen to nine (organic materials, total N, total P, total Na, total Ca, total alkalinity, soluble salt, K^+ and Na^+ contents) and continued reduced to five (organic materials, total N, total alkalinity, soluble salt and Na^+ contents), each curve shape calculated by SQDI

基金项目: 黑龙江省自然科学基金重点资助项目(ZJN0502-01); 国家科技支撑计划资助项目(2006BAC01A08)

收稿日期: 2007-09-18; 修订日期: 2008-03-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xfyang@mail.hl.cn

and PCA was also similar, yet the results of SNF (e. g., range of values) calculated by five factors were different from the results of nine and/or thirteen soil factors. The results also suggested that we may use nine soil factors to calculate SNF by SQDI rather than thirteen soil factors.

To test application of SQDI for calculating SNF, six new plots were established in the same field in 2007 where we had done in 1999, SQDI was individually calculated by thirteen and nine soil factors respectively, and the value of which were correspondingly located on the soil nutrition axes. The results showed that used SQDI to calculate SNF was feasibility and veracity in assessment soil quality degradation in Songnen alkaline grassland.

Key Words: soil quality degradation index; soil nutrition field; alkaline grassland

松嫩草原是我国东北三大草原和全国十大重点牧区之一,曾是产量高、草质好的优良放牧场和割草场,然而伴随着人类的开发利用,特别是过度放牧等不合理利用过程的加剧,近年来盐碱化程度大大提高,植被大面积严重退化。分析盐碱草地植被种群分布与土壤性质之间的关系对于指导松嫩盐碱草地植被的恢复具有十分重要的意义^[1]。在此前的研究中,为了定量分析松嫩盐碱草地植物种群分布与土壤营养间的关系,提出了土壤营养位的概念,采用主成分分析方法将众多代表土壤状况的指标归一为一个可以综合反映土壤性质的指标,并依此建立植被与土壤的对应关系,计算了相应的土壤营养位测度。同时,根据主成分分析中第一主分量贡献率和各指标在第一主分量上的负荷量大小依次减少土壤指标,最终确定 5 项土壤指标经“综合”即可较好地反映松嫩盐碱草地种群分布格局与土壤之间的关系^[2,3]。然而,利用主成分分析方法计算土壤营养指标有一定的局限性。当有新的土壤数据需要计算土壤营养位测度时,必须将新数据和原来的数据放在一起再次进行主成分分析,计算新的土壤营养指标,重新构造土壤营养轴,而不能将新数据直接代入。为使土壤营养位分析方法在生产实践中易于应用,需要寻求新的土壤营养指标计算方法来构造土壤营养轴,从而使新的土壤数据能够直接在土壤营养轴上找到相应位点,分析植物种群的分布情况,进而指导盐碱草地的改良。为此,探讨了利用土壤质量退化指数(soil quality degradation index)计算土壤营养指标来进行土壤营养位分析的方法。

1 土壤质量退化指数

土壤质量是土壤在生态系统边界范围内维持作物生产能力、保持环境质量及促进动植物健康的能力^[4]。目前定量地评价土壤质量的方法很多,土壤质量退化指数法是其中之一,近年来也有许多应用^[5-10]。它是以某种土壤类型为基准,假设其他的土壤类型都是由作为基准的土壤类型转变而来的,然后计算土壤各个属性在其他土壤类型与基准土壤类型之间的差异(以百分数表示),最后将各个属性的差异求和平均:

$$SQDI = \sum_{i=1}^n ((x_i - x_{i0})/x_{i0}) \times 100\% / n$$

式中, $SQDI$ 为土壤质量退化指数; x_{i0} 为基准土壤类型各土壤属性值; x_i 为其它土壤类型各土壤属性值; n 为选择的土壤属性数量。该指数能较好地反应土壤质量退化和改善的程度,即正值表示土壤质量有所改善,而负值表示土壤有退化的趋势^[11-13]。与此前采用的主成分分析法相比,应用土壤质量退化指数计算土壤营养位时只需将新的土壤类型与原有的基准土壤类型进行比较,将数据直接代入上述公式中,通过计算可以直接在原有的土壤营养轴上找到相应位置,并不需要与之前的一系列土壤类型数据重新组合进行主成分分析和土壤营养位分析。

以土壤质量退化指数法替代主成分分析法运用 MATLAB 6.5 软件对此前的野外测定数据^[2]重新进行分析,计算了相应的土壤营养位测度,并进行了比较。

2 应用土壤质量退化指数计算的土壤营养位

羊草群落是松嫩盐碱草地的顶极群落^[1],因此选取羊草相对地上生物量最高的土壤样地作为土壤质量退化指数计算的基准土壤(退化指数为 0),利用 13 项土壤指标(可溶盐含量、pH 值、总碱度即可溶盐中 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 含量之和、有机质含量、全氮含量、全磷含量、全钾含量、全钠含量、全钙含量、全镁含量以及可溶盐

中 K⁺ 含量、Na⁺ 含量和土壤相对含水量) 计算了土壤质量退化指数, 并作为土壤营养轴, 分别以相对生物量和总和优势度为土壤营养位效能指标进行土壤营养位分析(图 1), 由此计算的各项土壤营养位测度见表 1 和表 2。

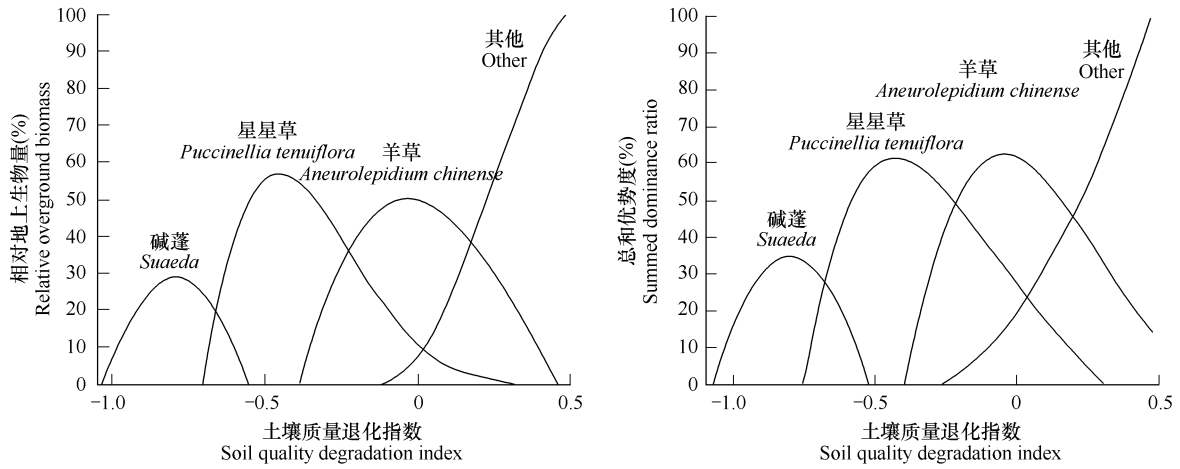


图 1 以 13 项指标代表土壤营养的土壤营养位分析

Fig. 1 Soil nutrition field analysis by 13 soil nutrition characters

表 1 以 13 项指标代表土壤营养的土壤营养位分析

Table 1 Soil nutrition field analysis by 13 soil nutrition characters

项目 Item	W				S			
	碱蓬 <i>Suaeda</i>	星星草 <i>Puccinellia tenuiflora</i>	羊草 <i>Aneurolepidium chinense</i>	其他 Other	碱蓬 <i>Suaeda</i>	星星草 <i>Puccinellia tenuiflora</i>	羊草 <i>Aneurolepidium chinense</i>	其他 Other
土壤营养位中心点 Center point of soil nutrition field	-0.792	-0.459	-0.035	0.475	-0.800	-0.428	-0.048	0.475
土壤营养位宽度 Breadth of soil nutrition field	0.476	1.014	0.846	0.648	0.549	1.059	0.871	0.741
土壤营养位体积 Volume of soil nutrition field	0.092	0.272	0.275	0.256	0.128	0.383	0.370	0.285

W:以相对地上生物量作为土壤营养位效能的计算结果 The calculated results by relative overground biomass serving as soil nutrition field efficiency; S:以总和优势度作为土壤营养位效能的计算结果 The calculated results by summed dominance ratio serving as soil nutrition field efficiency; 下同 the same below

表 2 以 13 项指标代表土壤营养的土壤营养位重叠

Table 2 Overlap of soil nutrition field by 13 soil nutrition characters

绝对土壤营养位重叠 Absolute overlap of soil nutrition field								
	碱蓬-星星草 <i>Suaeda-P. tenuiflora</i>	星星草-羊草 <i>P. tenuiflora-A. chinense</i>	星星草-其他 <i>P. tenuiflora-Other</i>	羊草-其他 <i>A. chinense-Other</i>				
W	0.016	0.108	0.015	0.098				
S	0.035	0.174	0.061	0.167				
相对土壤营养位重叠 Relative overlap of soil nutrition field								
	碱蓬 <i>Suaeda</i>	星星草 <i>P. tenuiflora</i>			羊草 <i>A. chinense</i>		其他 Other	
	星星草 <i>P. tenuiflora</i>	碱蓬 <i>Suaeda</i>	羊草 <i>A. chinense</i>	其他 Other	星星草 <i>P. tenuiflora</i>	其他 Other	星星草 <i>P. tenuiflora</i>	羊草 <i>A. chinense</i>
W	0.060	0.177	0.392	0.055	0.395	0.382	0.059	0.356
S	0.092	0.276	0.470	0.214	0.455	0.588	0.159	0.452

在前面的研究工作中,根据松嫩盐碱草地植被特点将试验样地植物分为“碱蓬(*Suaeda*)”、星星草(*Puccinellia tenuiflora*)、羊草(*Aneurolepidium chinense*)和“其他”。其中“碱蓬”包括碱蓬属(*Suaeda*)和碱蒿属(*Artemisia*)的一些强耐盐碱植物,而“其他”则包括寸草苔(*Carex duriuscula*)、火绒草(*Leontopodium leontopodioides*)、断肠草(*Stellera chamaejasme*)、黄芩(*Scutellaria baicalensis*)、防风(*Saposhnikovia divaricata*)、棉团铁线莲(*Clematis hexapetala*)、鸦葱(*Scorzonera austriaca*)、败酱(*Patrinia scabiosaefolia*)、旋复花(*Inula japonica*)、米口袋(*Gueldenstaedtia verna subsp. multiflora*)、叉枝蓼(*Polygonum tortuosum*)、点地梅(*Androsace umbellata*)、天门冬(*Asparagus cochinchinensis*)、针茅(*Stipa grandis*)、芦苇(*Phragmites australis*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)等等^[2]。从图 1 看,应用土壤质量退化指数法计算得到的种群土壤营养位函数曲线与此前应用主成分分析法^[2,3]得到的曲线形状相似。

3 土壤质量退化指数法和主成分分析法计算结果的比较

土壤质量退化指数法和主成分分析法所构造出的土壤营养轴不同,应用这两种方法得到的土壤营养位各测度指标不适宜直接比较。因此,对于土壤营养位宽度和土壤营养位体积,要以相对值进行比较。相对土壤营养位宽度是指实测的土壤营养位宽度占总土壤营养位宽度的比值(%),相对土壤营养位体积是指实测的土壤营养位体积占总土壤营养位体积的比值(%).总土壤营养位宽度指计算得出的土壤营养轴总长度,总土壤营养位体积则是最大土壤营养位效能与总土壤营养宽度的乘积。

从表 3 可以看出,应用土壤质量退化指数法和主成分分析法计算的相对土壤营养位宽度和相对土壤营养位体积是有差异的,以土壤质量退化指数法计算得到的相对土壤营养位宽度和相对土壤营养位体积多数情况下略大于主成分分析法的。其中,相对土壤营养位宽度的差异(2.6%~17.6%)要比相对土壤营养位体积(0.5%~4.6%)的明显。

表 3 两种方法计算以 13 项指标代表土壤营养的相对土壤营养位宽度和体积的比较

Table 3 Comparison of relative breadth and volume of soil nutrition field by 13 soil nutrition characters with the two methods

项目 Item	相对土壤营养位宽度(%) Relative breadth of soil nutrition field				相对土壤营养位体积(%) Relative volume of soil nutrition field				
	碱蓬 <i>Suaeda</i>	星星草 <i>P. tenuiflora</i>	羊草 <i>A. chinense</i>	其他 Other	碱蓬 <i>Suaeda</i>	星星草 <i>P. tenuiflora</i>	羊草 <i>A. chinense</i>	其他 Other	
	W	PCA	22.587	49.818	53.643	33.880	4.281	15.209	15.392
	SQDI	31.613	67.371	56.202	43.034	6.104	18.102	18.275	17.022
S	PCA	24.773	55.848	50.151	39.189	5.956	20.112	20.199	17.005
	SQDI	35.438	68.351	56.210	47.792	8.253	24.693	23.905	18.374

PCA: 主成分分析法的计算结果 The calculated results by Principal component analysis; SQDI: 土壤质量退化指数法的计算结果 The calculated results by Soil quality degradation index; 下同 the same below

4 土壤指标的筛选

应用主成分分析法计算土壤营养位时,根据第一主分量的贡献率以及各指标在第一主分量上的负荷量大小依次将土壤指标由原来的 13 项依次缩减为 9 项(可溶盐含量、总碱度、有机质含量、全氮含量、全磷含量、全钠含量、全钙含量、可溶盐中 K^+ 含量和 Na^+ 含量)和 5 项(可溶盐含量、总碱度、有机质含量、全氮含量和 Na^+ 含量)后考查土壤营养位各测度结果,结论是 13 项、9 项、5 项的计算结果是基本一致的^[2]。在此,应用土壤质量退化指数法也进行了上述 9 项和 5 项土壤指标的土壤营养位分析(表 4~表 7)。

以 13 项、9 项和 5 项土壤指标代表土壤营养状况得到的各土壤营养位函数曲线,形状是很相似的,但是从各项土壤营养位测度来看,13 项指标与 9 项指标的较接近,而 5 项指标与 13 项指标和 9 项指标的结果相差较大(例如 5 项指标的“其他”土壤营养位中心点较 13 项和 9 项的分别向左偏移了 0.15 和 0.14,土壤营养位宽度也分别减少了约 26% 和 27%),这与此前的结果^[2]不同。由此可见,应用土壤质量退化指数法对松嫩盐碱草地几种植物进行土壤营养位分析时,9 项指标可以替代 13 项指标,而 5 项指标所代表的信息并不能完全代表 13 项指标的,当土壤指标减少到 5 项时土壤营养位的分析结果就会受到影响。

表 4 以 9 项指标代表土壤营养的土壤营养位分析

Table 4 Soil nutrition field analysis by 9 soil nutrition characters

项目 Item	W				S			
	碱蓬 <i>Suaeda</i>	星星草 <i>P. tenuiflora</i>	羊草 <i>A. chinense</i>	其他 Other	碱蓬 <i>Suaeda</i>	星星草 <i>P. tenuiflora</i>	羊草 <i>A. chinense</i>	其他 Other
土壤营养位中心点 Center point of soil nutrition field	-0.755	-0.439	-0.030	0.461	-0.762	-0.414	-0.005	0.461
土壤营养位宽度 Breadth of soil nutrition field	0.430	0.994	0.801	0.696	0.496	1.040	0.865	0.716
土壤营养位体积 Volume of soil nutrition field	0.084	0.270	0.261	0.249	0.116	0.377	0.350	0.280

表 5 以 9 项指标代表土壤营养的土壤营养位重叠

Table 5 Overlap of soil nutrition field by 9 soil nutrition characters

绝对土壤营养位重叠 Absolute overlap of soil nutrition field								
	碱蓬-星星草 <i>Suaeda-P. tenuiflora</i>	星星草-羊草 <i>P. tenuiflora-A. chinense</i>	星星草-其他 <i>P. tenuiflora-Other</i>	羊草-其他 <i>A. chinense-Other</i>				
W	0.015	0.091	0.060	0.091				
S	0.031	0.165	0.064	0.149				
相对土壤营养位重叠 Relative overlap of soil nutrition field								
	碱蓬 <i>Suaeda</i>	星星草 <i>P. tenuiflora</i>		羊草 <i>A. chinense</i>		其他 Other		
	星星草 <i>P. tenuiflora</i>	碱蓬 <i>Suaeda</i>	羊草 <i>A. chinense</i>	其他 Other	星星草 <i>P. tenuiflora</i>	其他 Other	星星草 <i>P. tenuiflora</i>	羊草 <i>A. chinense</i>
W	0.054	0.175	0.348	0.064	0.336	0.365	0.059	0.349
S	0.083	0.268	0.470	0.229	0.437	0.528	0.170	0.415

表 6 以 5 项指标代表土壤营养的土壤营养位分析

Table 6 Soil nutrition field analysis by 5 soil nutrition characters

项目 Item	W				S			
	碱蓬 <i>Suaeda</i>	星星草 <i>P. tenuiflora</i>	羊草 <i>A. chinense</i>	其他 Other	碱蓬 <i>Suaeda</i>	星星草 <i>P. tenuiflora</i>	羊草 <i>A. chinense</i>	其他 Other
土壤营养位中心点 Center point of soil nutrition field	-0.690	-0.417	-0.026	0.320	-0.696	-0.371	-0.036	0.320
土壤营养位宽度 Breadth of soil nutrition field	0.365	0.797	0.709	0.491	0.420	0.923	0.728	0.531
土壤营养位体积 Volume of soil nutrition field	0.071	0.240	0.229	0.159	0.099	0.342	0.305	0.186

表 7 以 5 项指标代表土壤营养的土壤营养位重叠

Table 7 Overlap of soil nutrition field by 5 soil nutrition characters

绝对土壤营养位重叠 Absolute overlap of soil nutrition field								
	碱蓬-星星草 <i>Suaeda-P. tenuiflora</i>	星星草-羊草 <i>P. tenuiflora-A. chinense</i>	星星草-其他 <i>P. tenuiflora-Other</i>	羊草-其他 <i>A. chinense-Other</i>				
W	0.012	0.087	0.013	0.065				
S	0.033	0.156	0.052	0.112				
相对土壤营养位重叠 Relative overlap of soil nutrition field								
	碱蓬 <i>Suaeda</i>	星星草 <i>P. tenuiflora</i>		羊草 <i>A. chinense</i>		其他 Other		
	星星草 <i>P. tenuiflora</i>	碱蓬 <i>Suaeda</i>	羊草 <i>A. chinense</i>	其他 Other	星星草 <i>P. tenuiflora</i>	其他 Other	星星草 <i>P. tenuiflora</i>	羊草 <i>A. chinense</i>
W	0.052	0.174	0.379	0.084	0.362	0.409	0.056	0.285
S	0.097	0.336	0.512	0.278	0.456	0.601	0.151	0.367

同样,以 9 项指标代表土壤营养时,也较了土壤质量退化指数法和主成分分析法两种方法计算的相对土壤营养位宽度和相对土壤营养位体积(表 8)。两种方法相对土壤营养位宽度的差异(2.2% ~ 19.9%)仍大于相对土壤营养位体积的 1.7% ~ 5.4%,并且变化范围与前述以 13 项指标代表土壤营养的接近。就土壤质量退化指数法而言,以 13 项指标代表土壤营养与以 9 项指标代表土壤营养的相对土壤营养位宽度和相对土壤营养位体积的差异都较小,尤其相对土壤营养位体积的差异都在 1% 以下,最小时为 0.01%。当评价土壤营养的指标从 13 项减少至 9 项时,相对土壤营养位宽度和体积的分析结果受到的影响也较小,这与前文土壤营养位和土壤营养位重叠的分析结果是一致的,进一步确认了以该 9 项土壤营养指标即可应用土壤质量退化指数法计算土壤营养位。

表 8 两种方法计算以 9 项指标代表土壤营养的相对土壤营养位宽度和体积的比较

Table 8 Comparison of relative breadth and volume of soil nutrition field by 9 soil nutrition characters with the two methods

项目 Item	相对土壤营养位宽度(%) Relative breadth of soil nutrition field				相对土壤营养位体积(%) Relative volume of soil nutrition field				
	碱蓬 <i>Suaeda</i>	星星草 <i>P. tenuiflora</i>	羊草 <i>A. chinense</i>	其他 Other	碱蓬 <i>Suaeda</i>	星星草 <i>P. tenuiflora</i>	羊草 <i>A. chinense</i>	其他 Other	
	W	PCA	23.743	49.570	53.829	33.258	4.169	15.496	15.406
	SQDI	30.026	69.471	55.999	47.663	5.871	18.853	18.204	17.419
S	PCA	24.308	55.796	50.346	39.187	5.969	20.242	20.329	16.869
	SQDI	33.694	70.713	58.786	48.674	7.904	25.600	23.828	19.016

5 实例检验

为进一步验证土壤质量退化指数在进行土壤营养位分析及盐碱草地地上植被与土壤耦合机制研究时应用的可行性,于 2007 年 6 月下旬在以前的实验地^[2]选择了地上植被类型不同的 6 个样地,采集土壤样品,分析土壤的盐分、养分、水分指标,调查植物分布状况。分别以 13 项和 9 项指标代表土壤营养计算了土壤质量退化指数(表 9),并分别在图 1 和图 2 的土壤营养轴上找到相应位点,结果对应的地上植被与实际调查的结果非常吻合,验证了应用土壤质量退化指数分析土壤营养位的可行性以及应用土壤营养位分析盐碱草地地上植被与土壤耦合机制的准确性。

表 9 以 13 和 9 项指标代表土壤营养的土壤质量退化指数

Table 9 Soil quality degradation index by 13 and 9 soil nutrition characters

项目 Item	样地 I Plot I	样地 II Plot II	样地 III Plot III	样地 IV Plot IV	样地 V Plot V	样地 VI Plot VI
以 13 项指标代表土壤营养 13 soil nutrition characters	-0.911	-0.643	-0.368	-0.162	0.057	0.387
以 9 项指标代表土壤营养 9 soil nutrition characters	-0.887	-0.624	-0.353	-0.144	0.042	0.359

土壤质量退化指数法与 MATLAB 6.5 软件相结合分析土壤营养位,计算过程简单,有利于土壤营养位分析方法在生产实践中的应用,也为定量地分析盐碱草地植物种群分布与土壤营养状况间的关系提供了一种新方法。

生产实践中,选择少的土壤营养指标进行土壤营养位分析更好。运用土壤质量退化指数法评价土壤营养状况时所选择土壤营养指标的多少会影响土壤营养位各测度的计算结果。当土壤属性减少到一定程度时,其结果就缺乏代表性,所表达的信息就不能正确反应土壤营养情况。土壤质量退化指数只是将各土壤营养指标值进行数学运算,并未考虑到各因子的权重。若各土壤类型间土壤营养指标值差异较小,删去这样的指标并不会影响到最终的计算结果,如 pH 值、全钾含量、全镁含量和相对含水量,但是当删去那些变化幅度较大的指标时(如全磷含量、全钠含量、全钙含量、可溶盐中 K⁺ 含量)结果就会发生较大的变化。因此,如何正确、适宜并且尽量少地选择土壤营养指标将是应用土壤质量退化指数评价土壤营养位时需要重点考虑的问题。

References:

- [1] Yan Y F, Sun G R. Study of physiological ecology of *Puccinellia tenuiflora*. Beijing: Science Press, 2000.
- [2] Yan X F, Sun G R, Li J. Soil nutrient field analysis: an approach to analyzing the relationship between plant population distribution and soil nutrition on alkaline grassland. *Bulletin of Botanical Research*, 1999, 19(4): 435 – 444.
- [3] Yan X F, Sun G R, Li J. Soil nutrient field analysis for plant species in Songnen alkaline grassland. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(12): 1973 – 1985.
- [4] Doran J W, Timothy B P. Defining and Assessing Soil Quality. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA, 1994.
- [5] Wang B W, Chen L X. Review on methods of soil quality evaluation. *Science of Soil and Water Conservation*, 2006, 4(2): 120 – 126.
- [6] Zhang H L. Soil Quality and Sustainable of Soil Management. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(6): 119 – 122.
- [7] Zheng Z P, Liu Z X. Soil quality and its evaluation. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(1): 131 – 134.
- [8] Zhang X Y, Chen L D. The Progress and Prospect of Soil Quality Indicators and Evaluation Methods. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13(3): 30 – 34.
- [9] Liu Z F, Fu B J, Liu G H, *et al.* Soil quality: concept, indicators and its assessment. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3): 901 – 913.
- [10] Liu S L, Fu B J, Liu G H, *et al.* Research Review of Quantitative Evaluation of Soil Quality in China. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(1): 137 – 143.
- [11] Liu S L, Fu B J, Chen L D, *et al.* Comparison of two quantitative methods in assessing soil quality in different land use. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2003, 12(5): 422 – 466.
- [12] Li X Y, Tang H P, Zhao Y L, *et al.* Effects of land use on soil quality in Huailai Basin, Hebei Province. *Journal of Soil Water Conservation*, 2004, 18(6): 103 – 107.
- [13] Wang H, Huang Y, Yang B S, *et al.* Paddy soil quality assessment under rice-ryegrass rotation system in red soil region of mid-subtropics. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(12): 3271 – 3281.

参考文献:

- [1] 阎秀峰, 孙国荣. 星星草生理生态学研究. 北京: 科学出版社, 2000.
- [2] 阎秀峰, 孙国荣, 李晶. 盐碱草地植物种群分布与土壤营养关系的一种分析方法——土壤营养位分析. *植物研究*, 1999, 19(4): 435 ~ 444.
- [3] 阎秀峰, 孙国荣, 李晶. 松嫩盐碱草地几种植物的土壤营养位分析. *生态学报*, 2001, 21(12): 1973 ~ 1985.
- [5] 王博文, 陈立新. 土壤质量评价方法述评. *中国水土保持科学*, 2006, 4(2): 120 ~ 126.
- [6] 张海林. 土壤质量与土壤可持续管理. *水土保持学报*, 2002, 16(6): 119 ~ 122.
- [7] 郑昭佩, 刘作新. 土壤质量及其评价. *应用生态学报*, 2003, 14(1): 131 ~ 134.
- [8] 张心昱, 陈利顶. 土壤质量评价指标体系与评价方法研究进展与展望. *水土保持研究*, 2006, 13(3): 30 ~ 34.
- [9] 刘占锋, 傅伯杰, 刘国华. 土壤质量与土壤质量指标及其评价. *生态学报*, 2006, 26(3): 901 ~ 913.
- [10] 刘世梁, 傅伯杰, 刘国华. 我国土壤质量及其评价研究的进展. *土壤通报*, 2006, 37(1): 137 ~ 143.
- [11] 刘世梁, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 两种土壤质量变化的定量评价方法比较. *长江流域资源与环境*, 2003, 12(5): 422 ~ 466.
- [12] 李新宇, 唐海萍, 赵云龙, 等. 怀来盆地不同土地利用方式对土壤质量的影响分析. *水土保持学报*, 2004, 18(6): 103 ~ 107.
- [13] 王华, 黄宇, 阳柏苏, 等. 中亚热带红壤地区稻-稻-草轮作系统稻田土壤质量评价. *生态学报*, 2005, 25(12): 3271 ~ 3281.