

李白云,李 慧,郭鑫年,等. 基于最小数据集的宁夏耕地土壤质量评价[J]. 江苏农业科学,2021,49(9):195–201.  
doi:10.15889/j.issn.1002–1302.2021.09.035

# 基于最小数据集的宁夏耕地土壤质量评价

李白云<sup>1</sup>, 李 慧<sup>1</sup>, 郭鑫年<sup>2</sup>, 孙 娇<sup>2</sup>, 梁锦秀<sup>2</sup>, 龙怀玉<sup>3</sup>, 周 涛<sup>2</sup>

(1. 宁夏农林科学院园艺研究所, 宁夏银川 750001; 2. 宁夏农林科学院农业资源与环境研究所, 宁夏银川 750002;  
3. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

**摘要:**以宁夏耕地土壤为研究对象,选取 15 项土壤质量指标,运用主成分分析结合 Norm 值构建评价指标最小数据集(MDS),通过灰色关联度和非线性模型(non-linear model,简称 NL)进行土壤质量评价。研究表明,宁夏耕地土壤质量评价指标 MDS 包括全氮、全磷、胡敏酸碳量、交换性钙、交换性镁含量;2 种评价方法结果具有高度的正相关性,相关性系数为 0.88,相互验证了评价结果的准确性,非线性评分模型方法计算更加简便。研究区耕地土壤质量处于中下等水平,各地土壤质量依次为固原市>石嘴山市>银川市>吴忠市>中卫市。

**关键词:**最小数据集;非线性模型;灰色关联度;宁夏;土壤质量评价

**中图分类号:**S151.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1002–1302(2021)09–0195–06

土壤是农作物生产的基础,肥力是土壤的基本属性和本质特征,可衡量土壤对作物生长所需的各种养分的供给能力,也是土壤物理、化学和生物学性质的综合反映。土壤是陆地生态系统中结构最为复杂、功能最为活跃的生命层,因此科学而准确地对土壤性质进行评价尤为重要<sup>[1–2]</sup>。随着数理统计软件的广泛应用,土壤质量构成因素研究不断深入,评价方法越来越侧重多因素的综合评价。土壤质量评价涉及多方面指标,而大量指标的分析测定是比较繁琐的,因此,须要建立最小数据(minimum data set,简称 MDS)对土壤质量因素之间存在关联性进行评价。目前多数学者将灰色关联度分析法、聚类分析法、主成分分析法、隶属函数法的综合评价方法<sup>[3–7]</sup>,以及降维思想和模糊数学理论等方法逐步应用到土壤学研究中,国内外专家学者常将多个土壤结构属性和理化性质指标综合为土壤质量指数,以此来评价土壤生产力持续性和抵抗力稳定性。应用灰色关联度和非线性模型(non-linear model,简称 NL)方法分析筛选土壤质量评价指标,建立宁夏回族自治区土壤质量评价指标体系,并通

过土壤质量指数法验证最小数据集指标的有效性。本研究以宁夏回族自治区耕地为研究对象,在充分考虑常规养分指标的基础上,引入腐殖质组分指标,并结合交换性钙、交换性镁、交换性钾、交换性钠离子含量,通过主成分分析确定土壤指标的最小数据集,结合熵权法和公因子方法确定指标权重,运用灰色关联度和非线性评分模型构建土壤质量评价体系。土壤质量评价在利用主成分分析确定候选 MDS 过程中,本研究考虑了土壤因子在单个主成分上的载荷,以期全面了解宁夏耕地肥力状况,提供适合的土壤质量评价方法。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

宁夏回族自治区位于我国西部的黄河上游地区,地处 35°14′~39°23′N、104°17′~107°39′E,海拔超过 1 000 m,属于温带大陆性气候,年均气温 5.3~9.9℃,年无霜期 105~163 d,全区总降水量分布不均,南多北少,为 167~647 mm,该区域太阳辐射性强,蒸发量大,昼夜温度和年季温差大,四季分明<sup>[8]</sup>。土壤类型主要有黄绵土、灰钙土、灌淤土。

### 1.2 样品采集和分析

宁夏回族自治区 5 市玉米总面积为 31.09 万 hm<sup>2</sup>,占粮食作物面积的 42.3%。其中,银川市 4.03 万 hm<sup>2</sup>,石嘴山市 3.48 万 hm<sup>2</sup>,吴忠市 8.53 万 hm<sup>2</sup>,固原市 8.85 万 hm<sup>2</sup>,中卫市 6.20 万 hm<sup>2</sup><sup>[9]</sup>,在宁夏的 5 个市内选取 43 个玉米

收稿日期:2020–08–24

基金项目:宁夏农林科学院项目(编号:NKYZ–16–0906、NKYJ–17–02、NKYP–19–03)共同资助。

作者简介:李白云(1979—),男,河北承德人,硕士,副研究员,主要从事果树矿物营养研究。E-mail:124495776@qq.com。

通信作者:周 涛,博士,研究员,主要从事土壤肥力演变与环境效应等研究工作。E-mail:zhoutao6084609@163.com。

田块,于 2018 年 10—11 月采集土壤样品,采集方法:以“S”形布点法采集深度为 0 ~ 30 cm 的 8 ~ 10 个样点,将土壤样品混合均匀,用四分法取样 1 kg/份左右,共 43 份,做好标记,带回实验室,采样情况见表 1。

pH 值测定采用电位法,电导率测定采用电极

法,全氮含量测定采用半微量凯氏定氮法,全磷含量测定采用高氯酸 – 硫酸法,全钾含量测定采用原子吸收法,速效磷含量测定采用钼锑抗比色法,腐殖质碳量组成测定采用腐殖质组成修改法<sup>[10]</sup>,交换性钙离子、镁离子、钾离子、钠离子含量测定采用乙酸铵浸提 – 火焰光度法。

表 1 宁夏耕地土壤样品基本情况

地市	采样地点	经纬度	土壤类型	地形	样品数(个)	编号
固原市	原州区彭堡镇、西吉县火石寨乡、隆德县张程乡和莫安乡、彭阳县城阳乡、彭阳县白羊镇、彭阳县王洼镇、六盘山国家森林公园、泾源县绿塬林场、原州区市区	105° 30′ 1. 6″ ~ 106° 46′ 16. 4″ E、35° 25′ 30. 2″ ~ 36° 25′ 20″ N	黑垆土、灰褐土、黄绵土、亚高山草甸土	山地	10	1 ~ 10
石嘴山市	惠农区园艺镇、惠农区燕子墩乡、陶乐县高仁镇乡、平罗县星海镇、平罗县西大滩镇、平罗县崇岗镇	106° 10′ 9. 1″ ~ 106° 44′ 3. 5″ E、38° 49′ 26. 8″ ~ 39° 19′ 18. 6″ N	灰漠土、盐土、风沙土、碱土、潮土	平原、高原	6	11 ~ 16
吴忠市	同心县河西镇、同心县兴隆乡韦州镇、盐池县惠安堡镇、盐池县花马池镇、利通区金银滩镇、红寺堡区柳泉乡、红堡区南川乡	106° 8′ 43. 3″ ~ 107° 21′ 11. 9″ E、37° 10′ 24. 1″ ~ 38° 05′ 24. 8″ E	风沙土、灰钙土、淡灰钙土	高原	9	17 ~ 25
银川市	滚钟口风景区、灵武市宁东镇、灵武市梧桐树乡、灵武市白土岗乡、西夏区平吉堡农场四队	105° 57′ 15. 7″ ~ 106° 39′ 46. 0″ E、37° 40′ 7. 2″ ~ 38° 43′ 8″ N	亚高山草甸、灌淤土、灰钙土、沼泽土	高原	9	26 ~ 34
中卫市	中宁县石空镇、中宁县喊叫水乡、沙坡头区大战场镇、海原县曹洼乡	104° 50′ 18. 8″ ~ 105° 58′ 22. 1″ E、36° 22′ 31. 9″ ~ 37° 36′ 54. 3″ N	风沙土、灰钙土、黄绵土、石质土	高原	9	35 ~ 43

1.3 数据处理方法

运用 Excel 2010 进行原始数据的简单处理,采用 SPSS 20.0 软件对试验数据进行分析。土壤质量评价的最小数据集(MDS)确定的方法参考吴玉红等的研究,利用熵权法和公因子方差来确定指标权重,综合分析方法采用灰色关联度<sup>[11-12]</sup>和非线性模型<sup>[13]</sup>,通过土壤质量综合评价指数和权重加权求和,比较各地区耕地质量。

2 结果与分析

2.1 宁夏耕地土壤质量指标统计描述

表 2 表明,宁夏耕地土壤养分含量分布不均匀。土壤平均 pH 值为 8.46,属于微碱性土壤<sup>[14]</sup>。电导率平均值为 0.39 mS/cm,小于作物生育障碍临界点(0.5 mS/cm)<sup>[15]</sup>,电导率最大值为 3.49 mS/cm,大于临界值,应对进行相应的区域进行土壤改良。全氮、全磷、全钾、速效磷含量平均值分别为 0.61、0.36、14.12、6.75 mg/kg,根据全国第 2 次土壤普查分级标准<sup>[16]</sup>,全氮、全磷含量为缺乏型,全钾、速效磷含量适中。土壤腐殖质是土壤有机质的主体,一般占土壤有机质含量的 60% ~ 90%<sup>[17]</sup>。腐殖质是

由胡敏酸、富啡酸以及存在残渣中的胡敏素等组成,宁夏耕地腐殖质含量、腐殖酸含量、胡敏酸含碳量、富啡酸含碳量、胡敏素含碳量平均值分别为 7.02、2.72、0.77、1.95、4.30 g/kg。交换性钙、交换

表 2 宁夏耕地土壤质量指标

指标	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数
pH 值	9.58	6.73	8.46	0.51	0.06
电导率(mS/cm)	3.49	0.04	0.39	0.69	1.77
全氮含量(g/kg)	2.41	0.10	0.61	0.50	0.82
全磷含量(g/kg)	0.76	0.02	0.36	0.21	0.58
全钾含量(g/kg)	23.40	1.02	14.12	7.61	0.54
速效磷含量(mg/kg)	38.73	0.10	6.75	9.54	1.41
腐殖质含量(g/kg)	27.44	0.77	7.02	6.02	0.86
腐殖酸含量(g/kg)	13.20	0.15	2.72	2.89	1.06
胡敏酸含碳量(g/kg)	4.99	0.04	0.77	0.85	1.10
富啡酸含碳量(g/kg)	11.76	0.02	1.95	2.66	1.36
胡敏素含碳量(g/kg)	17.05	0.57	4.30	3.97	0.92
交换性钙含量(cmol/kg)	10.40	0.12	3.54	2.56	0.72
交换性镁含量(cmol/kg)	3.93	0.29	1.41	0.91	0.65
交换性钾含量(cmol/kg)	1.73	0.04	0.35	0.31	0.89
交换性钠含量(cmol/kg)	4.91	0.02	0.66	0.95	1.44

注:样本数为 43 个。

性镁、交换性钾、交换性钠含量平均值分别为 3.54、1.41、0.35、0.66 cmol/kg。土壤各养分含量最大值和最小值存在明显差异,变异系数范围在 0.06 ~ 1.77。在土壤学研究中通常进行如下定义:变异系数( $CV$ ) $\leq 0.1$  为弱变异,  $0.1 < CV < 1.0$  为中等变异,  $CV \geq 1.0$  为强变异<sup>[5]</sup>。由此可知,宁夏耕地土壤的 pH 值为弱变异,相对稳定,变幅较小;全氮含量、全磷含量、全钾含量、腐殖质含量、胡敏素含碳量、交换性钙含量、交换性镁含量、交换性钾含量为中等变异;电导率、速效磷含量、腐殖酸含量、胡敏酸含碳量、富啡酸含碳量、交换性钠含量为强变异,说明含量不稳定,变幅较大。

2.2 土壤质量最小数据集的确定

最小数据集是一种对土壤质量评价的方法,其重要作用在于可以通过测定比较少的数据了解土壤的变化情况<sup>[18]</sup>。主成分分析法能够较好地处理

变量间的多重相关性,使各指标间具有相互独立性,是确定 MDS 最常用的方法<sup>[3]</sup>。由表 3 可知,对 15 项土壤属性指标做主成分分析,提取到特征值大于 1 的 3 个主成分,其特征值分别为 5.168、3.229、2.327,累计贡献率达到 71.495%,由此可知这 3 个主成分可以表达原始数据的大部分信息。主成分 1 的贡献率达 34.454%,全氮含量、腐殖质含量、腐殖酸含量、富啡酸含碳量有较高的正载荷值,pH 值有较高的负载荷值;主成分 2 的贡献率为 21.528%,全磷含量、全钾含量、交换性钙含量、交换性镁含量、交换性钠含量有较高的正载荷值;主成分 3 的贡献率为 15.513%,反映了速效磷含量、交换性钾含量有较高的正载荷值,胡敏酸含碳量有较高的负载荷值。不同土壤质量指标公因子方差不同,腐殖质含量公因子方差最大,为 0.930,速效磷含量公因子方差最小,为 0.415。

表 3 土壤各肥力指标主成分分析结果与 Norm 值

指标	载荷值			公因子方差	分组	Norm 值
	主成分 1	主成分 2	主成分 3			
pH 值	-0.743	0.360	0.020	0.764	1	1.809
电导率	-0.169	0.402	0.305	0.870		0.941
全氮含量	0.953	0.036	0.068	0.913	1	2.170
全磷含量	0.026	0.803	-0.475	0.851	2	1.616
全钾含量	-0.122	0.746	-0.536	0.876	2	1.595
速效磷含量	0.102	0.096	0.685	0.415	3	1.084
腐殖质含量	0.937	0.071	0.166	0.930	1	2.149
腐殖酸含量	0.937	0.103	-0.071	0.898	1	2.141
胡敏酸含碳量	0.340	0.394	-0.591	0.615	3	1.383
富啡酸含碳量	0.910	-0.014	0.112	0.841	1	2.076
胡敏素含碳量	0.738	0.033	0.303	0.709	1	1.741
交换性钙含量	0.562	0.570	-0.186	0.651	2	1.662
交换性镁含量	-0.036	0.735	0.479	0.749	2	1.512
交换性钾含量	-0.208	0.385	0.505	0.680	3	1.138
交换性钠含量	-0.219	0.735	0.493	0.874	2	1.599
主成分特征值	5.168	3.229	2.327			
方差贡献率(%)	34.454	21.528	15.513			
累计方差贡献率(%)	34.454	55.982	71.495			

注:电导率各主成分载荷值均小于 0.5,故不进行分组。

通过主成分分析,将每个特征值 $\geq 1$ 的主成分中因子荷载绝对值 $\geq 0.5$ 土壤参数选出分为一组<sup>[19]</sup>,结果如表 3 所示。若某个指标在不同主成分中的荷载均大于 0.5,则将其并入与其他指标相关性较低的一组,其中电导率因在各主成分的荷载都小于 0.5,排除在分组外。Norm 值的几何意义为该

变量在由主成分组成的多维空间中的矢量模长度, Norm 值越大,长度越长,则表明该变量对所有主成分的综合载荷越大<sup>[20-21]</sup>,该指标所包含的土壤质量信息就越多。根据每组中 Norm 值在最高总分值的 10% 范围以内、相关性系数(表 4)低于 0.5、变异系数不宜过高的原则<sup>[11-12]</sup>,最终选定的 MDS 指标有

5 个:全氮含量、全磷含量、胡敏酸含碳量、交换性钙含量、交换性镁含量。

表 4 参评 MDS 指标相关系数矩阵

指标	相关系数				
	全氮含量	全磷含量	胡敏酸含碳量	交换性钙含量	交换性镁含量
全氮含量	1.000 0				
全磷含量	0.031 0	1.000 0			
胡敏酸含碳量	0.283 0	0.500 0	1.000 0		
交换性钙含量	0.469 0	0.499 0	0.527 0	1.000 0	
交换性镁含量	0.035 0	0.330 0	-0.001 0	0.308 0	1.000 0

2.3 灰色关联度分析

根据参评的 MDS 指标和灰色系统理论要求,将 43 份土样的 5 个指标视为一个整体。选择 5 项指标的最大值为最优指标集,即  $X_0(j) = \{2.41, 0.76, 4.99, 10.40, 3.93\}$ ,进行无量纲化处理,将其转化为 0~1 间的标准化数据。根据公式  $\Delta_i(j) = |X_0(j) - X_i(j)|$  计算绝对差值,其中  $i$  表示 0~43 号样品, $j$  表示 0~5 号样品,二级最小差  $\min_i \min_j |X_0(j) - X_i(j)|$  为 0,二级最大差  $\max_i \max_j |X_0(j) - X_i(j)|$  为 0.991 2。

$$\zeta_i(j) = \frac{\min_i \min_j |X_0(j) - X_i(j)| + \rho \max_i \max_j |X_0(j) - X_i(j)|}{|X_0(j) - X_i(j)| + \rho \max_i \max_j |X_0(j) - X_i(j)|} \quad (1)$$

利用公式(1)分别计算关联度(表 5)。采用熵权法确定果实品质指标的权重,全氮含量、全磷含量、胡敏酸含碳量、交换性钙含量、交换性镁含量权重分别为 0.195、0.173、0.318、0.178、0.136,其中全氮含量、胡敏酸含碳量权重较大。将关联度乘以权重后进行加权,计算各地加权关联度。

2.4 土壤质量非线性模型分析

非线性模型是通过非线性模型将指标值转换为 0~1 之间适当的分值,模型公式为  $S_{NL} = a/[1 + (x/\bar{x})^b]$ 。其中: $a$  为最大得分,被确定为 1; $x$  是土壤实测指标值; $\bar{x}$  为相应的指标平均值, $b$  为方程斜率,表示类型指标值。其中,“越多越好”类型的  $b$  被确定为 -2.5,“越少越好”类型的  $b$  被确定为 2.5<sup>[13,19]</sup>。MDS 的 5 个指标与土壤质量呈正相关关系, $b$  取值为 -2.5,非线性模型值详见表 6。

采用公因子方差确定果实品质指标的权重,全氮含量、全磷含量、胡敏酸含碳量、交换性钙含量、交换性镁含量的权重分别为 0.237、0.226、0.161、

表 5 宁夏不同地区土壤质量指标的关联度

土样编号	关联度				
	全氮含量	全磷含量	胡敏酸含碳量	交换性钙含量	交换性镁含量
1	1.00	0.74	0.41	0.63	0.67
2	0.45	0.73	0.48	0.72	0.46
3	0.38	0.63	0.42	0.54	0.37
4	0.49	0.61	1.00	0.64	0.36
5	0.43	0.59	0.43	0.59	0.41
6	0.42	0.65	0.37	0.45	0.36
7	0.39	0.72	0.36	0.41	0.43
8	0.44	0.35	0.34	0.67	0.38
9	0.88	0.35	0.35	0.50	0.36
10	0.46	0.35	0.34	0.58	0.39
11	0.36	0.47	0.37	0.40	0.36
12	0.39	0.70	0.37	0.55	0.67
13	0.34	0.46	0.34	0.36	0.35
14	0.38	0.60	0.34	0.49	0.71
15	0.37	0.64	0.34	0.53	1.00
16	0.42	0.81	0.45	1.00	0.75
17	0.39	0.50	0.38	0.51	0.65
18	0.37	0.44	0.36	0.42	0.37
19	0.36	0.47	0.41	0.40	0.51
20	0.38	0.54	0.38	0.37	0.41
21	0.39	0.48	0.37	0.40	0.38
22	0.36	0.59	0.36	0.38	0.41
23	0.34	0.34	0.34	0.33	0.68
24	0.36	0.35	0.34	0.36	0.44
25	0.35	0.34	0.34	0.34	0.39
26	0.43	1.00	0.38	0.58	0.50
27	0.37	0.48	0.38	0.37	0.39
28	0.38	0.56	0.39	0.39	0.46
29	0.37	0.47	0.37	0.37	0.39
30	0.36	0.52	0.35	0.46	0.41
31	0.35	0.50	0.37	0.37	0.40
32	0.63	0.36	0.34	0.35	0.37
33	0.42	0.35	0.34	0.35	0.48
34	0.37	0.35	0.33	0.35	0.48
35	0.34	0.40	0.34	0.36	0.37
36	0.37	0.55	0.35	0.38	0.40
37	0.41	0.48	0.38	0.37	0.46
38	0.39	0.54	0.37	0.39	0.39
39	0.35	0.60	0.35	0.40	0.38
40	0.37	0.57	0.35	0.37	0.49
41	0.39	0.58	0.37	0.39	0.44
42	0.42	0.35	0.34	0.39	0.41
43	0.37	0.34	0.33	0.38	0.37

表 6 不同地区土壤质量指标的非线性模型值

土样 编号	土壤质量指标				
	全氮含量	全磷含量	胡敏酸 含碳量	交换性钙 含量	交换性 镁含量
1	0.97	0.80	0.83	0.86	0.87
2	0.77	0.01	0.05	0.83	0.22
3	0.75	0.80	0.94	0.90	0.58
4	0.37	0.73	0.85	0.79	0.10
5	0.84	0.72	0.99	0.87	0.07
6	0.69	0.69	0.88	0.84	0.37
7	0.63	0.75	0.48	0.59	0.05
8	0.41	0.79	0.42	0.39	0.47
9	0.72	0.01	0.01	0.88	0.19
10	0.96	0.01	0.18	0.73	0.08
11	0.11	0.46	0.45	0.33	0.08
12	0.46	0.78	0.46	0.80	0.87
13	0.01	0.41	0.01	0.08	0.02
14	0.36	0.71	0.07	0.70	0.88
15	0.24	0.74	0.01	0.78	0.93
16	0.62	0.83	0.92	0.94	0.89
17	0.45	0.55	0.59	0.74	0.86
18	0.20	0.33	0.34	0.46	0.14
19	0.15	0.46	0.83	0.35	0.72
20	0.31	0.62	0.61	0.14	0.35
21	0.44	0.48	0.44	0.30	0.17
22	0.16	0.69	0.39	0.19	0.39
23	0.01	0.00	0.02	0.00	0.87
24	0.14	0.01	0.02	0.05	0.50
25	0.04	0.00	0.01	0.01	0.23
26	0.69	0.87	0.65	0.83	0.69
27	0.18	0.50	0.59	0.15	0.23
28	0.38	0.65	0.73	0.26	0.61
29	0.19	0.45	0.49	0.13	0.22
30	0.13	0.58	0.10	0.63	0.37
31	0.07	0.55	0.54	0.12	0.32
32	0.93	0.02	0.07	0.03	0.11
33	0.64	0.02	0.01	0.02	0.64
34	0.19	0.01	0.00	0.03	0.65
35	0.03	0.17	0.05	0.07	0.10
36	0.18	0.63	0.22	0.21	0.32
37	0.55	0.47	0.63	0.11	0.60
38	0.47	0.62	0.50	0.29	0.24
39	0.04	0.71	0.10	0.32	0.20
40	0.25	0.67	0.16	0.12	0.68
41	0.42	0.68	0.53	0.25	0.54
42	0.62	0.01	0.02	0.23	0.39
43	0.23	0.00	0.00	0.16	0.09

0.175、0.201,其中全氮、全磷含量的权重较大。将隶属函数值乘以权重后进行加权,计算各地综合评价值。

2.5 土壤质量结果评价

将 2 种土壤质量评价方法的结果进行相关性分析,结果表明,2 种方法的评价结果相关性系数为 0.88,具有高度的正相关性,因此 2 种评价方法的结果具有很好的一致性,相互验证了准确性。从图 1 可以看出,2 种方法下宁夏耕地土壤肥力曲线变化趋势大体一致,灰色关联度的土壤质量综合评分为 0.35~0.68,平均值为 0.44,变异系数为 17.96%;非线性评分模型方法的土壤质量综合评分为 0.06~0.87,平均值为 0.41,变异系数为 48.67%,其中非线性评分模型综合评价变异程度较大。2 种方法中排序都在前 10 名的有 1、3、5、6、12、14、15、16、26 号土壤质量较好;排序都在后 10 名的有 11、13、23、24、25、34、35、42、43 号土壤质量较差。由表 7 可知,2 种方法中土壤质量依次为固原市>石嘴山市>银川市>吴忠市>中卫市。

3 讨论与结论

在一定土壤-作物-气候条件下,土壤质量的是衡量土壤肥力、土壤环境及作物生产可持续性的重要指标<sup>[22]</sup>。目前并没有统一的土壤质量评价标准和评价方法,评价指标有所差异<sup>[23]</sup>。最小数据集是评价土壤质量的最少指标集,且本研究利用主成分分析结合 Norm 值进行最小数据集的筛选,考虑指标在所有主成分上的载荷<sup>[24]</sup>,科学地简化了指标数据集<sup>[24-26]</sup>。刘引等采用主成分 Norm 值方法,建立了有机质、全磷、速效磷、有效镁以及有效铁含量 5 个指标组成的 MDS<sup>[27]</sup>。杜发兴等运用主成分分析结合 Norm 值构建以土壤容重、黏粒有机质含量、有效磷含量、阳离子交换量、pH 值、微生物含碳含量和微生物氮的最小数据集评价石漠化地区土壤质量<sup>[12]</sup>。本研究采用主成分 Norm 值方法建立了全氮含量、全磷含量、胡敏酸含碳量、交换性钙含量、交换性镁含量 5 个指标组成的 MDS,与上述研究的土壤 MDS 指标存在相同之处,有较好的代表性。碳、氮、磷含量是影响土壤质量水平的重要因子,其含量和分布对植物的生长发育起着非常重要的作用<sup>[28-29]</sup>,土壤交换性钙、交换性镁含量是影响作物产量和品质的重要因素<sup>[30]</sup>。因此,本研究选出的 5 个 MDS 指标对于宁夏耕地土壤质量评价具有一定的实际意义。

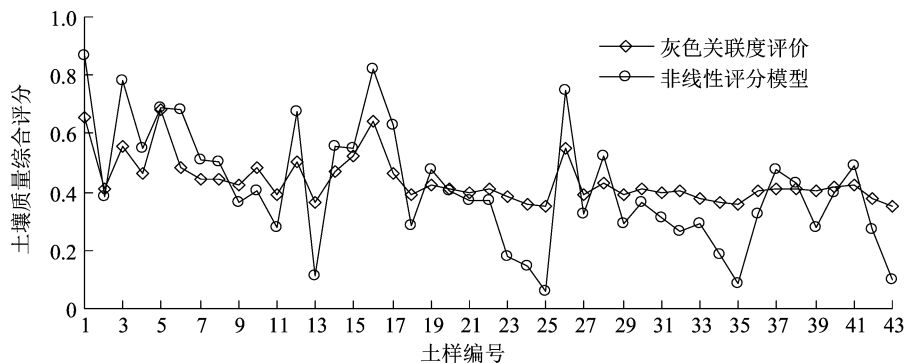


图1 宁夏耕地土壤质量综合评价散点图

表 7 不同地区土壤质量综合评价得分

方法	得分				
	固原市	石嘴山市	吴忠市	银川市	中卫市
灰色关联度	0.505	0.482	0.399	0.412	0.395
非线性评分模型	0.574	0.498	0.325	0.366	0.317

本研究采用熵权法和主成分公因子方差法来确定指标权重,建立全氮、全磷、胡敏酸碳量、交换性钙、交换性镁含量土壤质量最小数据集评价宁夏部分区域土壤质量的方法。评价结果显示,2 种方法的土壤质量综合指数平均值均小于 0.5,说明宁夏耕地土壤质量处于中下等水平,固原市耕地土壤质量较佳。宁夏土壤偏碱性,交换性钙、交换性镁在偏碱的北方土壤中含量较丰富<sup>[31]</sup>,但全氮、全磷、有机质含量较低,是造成土壤质量处于中下等水平的主要原因。土壤质量因子受不同作物生长、样地选择等因素影响,往往表现出不同的结果,但鉴于目前宁夏土壤质量评价比较缺乏,本研究采用土壤质量评价 MDS 对于今后的研究和实践依然具有重要参考意义,为更精准地评价土壤质量应结合种植作物生长因素,这样评价结果会更加精准。

参考文献:

[1]胡婵娟,郭 雷. 植被恢复的生态效应研究进展[J]. 生态环境学报,2012,21(9):1640 - 1646.

[2]房全孝. 土壤质量评价工具及其应用研究进展[J]. 土壤通报, 2013,44(2):496 - 504.

[3]刘 斌,王松标,李 鑫,等. 攀枝花市成龄芒果园土壤肥力评价[J]. 热带作物学报,2020,41(1):1 - 6.

[4]郑敏娜,梁秀芝,李荫藩,等. 紫花苜蓿人工草地土壤肥力的灰色关联度分析[J]. 中国草地学报,2017,39(2):111 - 116.

[5]崔超岗,周冀衡,李 强,等. 陆良县植烟土壤类型与土壤肥力的灰色关联度分析[J]. 西南农业学报,2016,29(5):1172 - 1176.

[6]刘少春,张跃彬,郭家文,等. 基于养分丰缺分级的蔗田土壤肥力主成分综合分析[J]. 西南农业学报,2016,29(3):611 - 617.

[7]吴海燕,金荣德,范作伟,等. 基于主成分和聚类分析的黑土肥力

质量评价[J]. 植物营养与肥科学报,2018,24(2):325 - 334.

[8]李 娜. 气候变化对宁夏冬、春小麦产量影响研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2017.

[9]王旭明. 宁夏调查年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2019:274 - 275.

[10]万晓晓,石元亮,依艳丽. 长期秸秆还田对白浆土有机碳含量及腐殖质组成的影响[J]. 中国土壤与肥料,2012(3):7 - 11.

[11]吴玉红,田霄鸿,同延安,等. 基于主成分分析的土壤肥力综合指数评价[J]. 生态学杂志,2010,29(1):173 - 180.

[12]杜发兴,吴登峰,吴厚发,等. 基于灰色关联度的石漠化地区土壤质量评价[J]. 西南农业学报,2019,32(9):2102 - 2108.

[13]李鹏飞,张兴昌,郝明德,等. 基于最小数据集的黄土高原矿区复垦土壤质量评价[J]. 农业工程学报,2019,35(16):265 - 273.

[14]闵 炬,董刚强,谢文明,等. 管花肉苁蓉寄生柽柳林地土壤养分调查研究[J]. 土壤,2018,50(1):73 - 78.

[15]范庆锋,张玉龙,陈 重,等. 保护地土壤盐分积累及其离子组成对土壤 pH 值的影响[J]. 干旱地区农业研究,2009,27(1):16 - 20.

[16]全国土壤普查办公室. 全国第二次土壤普查暂行技术规程[M]. 北京:农业出版社,1979.

[17]窦 森. 土壤腐殖物质形成转化及其微生物学机理研究进展[J]. 吉林农业大学学报,2008(4):538 - 547.

[18]刘金山,胡承孝,孙学成,等. 基于最小数据集和模糊数学法的水旱轮作区土壤肥力质量评价[J]. 土壤通报,2012,43(5):1145 - 1150.

[19]Zhang C, Xue S, Liu G B, et al. A comparison of soil qualities of different revegetation types in the Loess Plateau, China[J]. Plant Soil,2011,347(1):163 - 178.

[20]李桂林,陈 杰,孙志英,等. 基于土壤特征和土地利用变化的土壤质量评价最小数据集确定[J]. 生态学报,2007,27(7):2715 - 2724.

[21]Yemefack M, Jetten V G, Rossiter D G. Developing a minimum data set for characterizing soil dynamics in shifting cultivation systems[J]. Soil & Tillage Research,2006,86(1):84 - 98.

[22]谢 坚,郑圣先,杨曾平,等. 湖南双季稻种植区不同生产力水稻土质量综合评价[J]. 中国农业科学,2010,43(23):4840 - 4851.

[23]金慧芳,史东梅,陈正发,等. 基于聚类及 PCA 分析的红壤坡耕地耕层土壤质量评价指标[J]. 农业工程学报,2018,34(7):155 - 164.

张婧怡,王爱兵,黄 成,等. 互花米草枯落物对克氏原螯虾的微生物选择及生长的影响[J]. 江苏农业科学,2021,49(9):201-205.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.09.036

# 互花米草枯落物对克氏原螯虾的微生物选择及生长的影响

张婧怡,王爱兵,黄 成,刘茂松

(南京大学生命科学学院,江苏南京 210023)

**摘要:**为探究枯落物流入滨海滩涂系统后对底栖动物生境及自身生长的影响,设置试验观察克氏原螯虾在混入互花米草和芦苇的枯落物的土壤基质中的生存状态及对微生物的偏好,并增设添加 EM 菌干预以提高生态利用价值。结果表明,螯虾对不同土壤基质的选择存在时空格局变化。对于微生物选择,白天作为对照的清水组选择量最高。夜晚时,互花米草组和泥土组选择量显著最高;2 周后日间的选择量无显著变化且夜晚的泥土组选择量仍最高,但互花米草组选择量大幅下降,明显低于芦苇组,提示互花米草枯落物的腐解改变了生境土壤状况。在存活率方面,添加 EM 菌的互花米草组的克氏原螯虾 8 周后的存活率显著高于芦苇组和单互花米草组,雌性克氏原螯虾的体质量增长率也显著提高,但存活率仍低于空白对照的纯泥土基质。一定程度上证明 EM 菌能部分改善腐解所造成的生境恶化现象。鉴于试验中互花米草枯落物及其快速腐解产生的累积效应,未来将进一步探索更加有效的微生物制剂加快互花米草腐解,改善互花米草生长区底栖动物的生存环境,提高生境土壤的竞争力。

**关键词:**互花米草;枯落物;栖息地生境;克氏原螯虾;底栖动物

**中图分类号:** S966.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2021)09-0201-05

互花米草(*Spartina alterniflora*)属多年生  $C_4$  草本植物,原产于美洲大西洋西海岸以及墨西哥湾<sup>[1]</sup>,我国上个世纪引入后迅速蔓延,目前已成为我国海岸滩涂湿地生态系统最主要的外来植物之一<sup>[2]</sup>。江苏沿海于 1980 年引进互花米草<sup>[3]</sup>,沿海超过 410 km 的海岸线分布着宽度超过 4 km 的互花米草沼泽<sup>[4]</sup>,已形成入侵种群。本次试验样地位于江苏

盐城滨海湿地( $32^{\circ}34' N \sim 34^{\circ}28' N$ 、 $119^{\circ}48' E \sim 120^{\circ}56' E$ ),是列入《世界遗产名录》的中国黄(渤)海候鸟栖息地,同样也是全球第二块潮间带湿地遗产、江苏省首项自然遗产,所以对盐城滨海滩涂湿地生态系统的功能提升及适应性管理的研究有重大意义。

近年来,互花米草在盐城滨海盐沼中快速入侵,对土著植物芦苇(*Phragmites australis*)、底栖动物<sup>[5]</sup>及湿地生态系统食物网结构<sup>[6]</sup>均具有很大影响。植物群落净第一生产力的大部分是以枯落物的形式进入食物链<sup>[7]</sup>。以往研究大多是研究植物残体的流入对土壤微生物理化性质的改变,而本次研究以底栖动物对栖息地选择及生长为指标,探究

收稿日期:2020-09-06

基金项目:国家重点研发计划(编号:2017YFC0506206);国家自然科学基金委项目(编号:NSFCJ1103512)。

作者简介:张婧怡(1995—),女,河北沧州人,硕士研究生,从事生态学研究。E-mail:littlezhangjy@163.com。

通信作者:刘茂松,博士,副教授,从事生态学研究。E-mail:msliu@nju.edu.cn。

[24] 贡 璐,张雪妮,冉启洋,等. 基于最小数据集的塔里木河上游绿洲土壤质量评价[J]. 土壤学报,2015,52(3):682-689

[25] 贡 璐,张海峰,吕光辉,等. 塔里木河上游典型绿洲不同连作年限棉田土壤质量评价[J]. 生态学报,2011,31(14):4136-4143.

[26] 刘伟玮,刘某承,李文华,等. 辽东山区林参复合经营土壤质量评价[J]. 生态学报,2017,37(8):2631-2641.

[27] 刘 引,颜鸿远,欧小宏,等. 基于最小数据集的麻城菊花种植区土壤肥力质量评价[J]. 中国中药杂志,2019,44(24):5382-5389.

[28] 李鹏飞,张兴昌,郝明德,等. 基于最小数据集的黄土高原矿区复垦土壤质量评价[J]. 农业工程学报,2019,35(16):265-273.

[29] 张 婷,翁 月,姚凤娇,等. 放牧强度对草甸植物小叶章及土壤化学计量比的影响[J]. 草业学报,2014,23(2):20-28.

[30] 曹榕彬. 宁德市耕地土壤交换性钙镁数据空间分布特征及影响因素分析[J]. 河南农业大学学报,2018,52(3):437-444.

[31] 李丹萍,刘敦一,张白鸽,等. 不同镁肥在中国南方三种缺镁土壤中的迁移和淋洗特征[J]. 土壤学报,2018,55(6):1513-1524.