

渭北旱塬土壤生化活性特征研究

谭向平^{1a,1b}, 孔 龙^{1b}, 和文祥^{1b}, 王旭东^{1b}, 郝明德², 唐 明^{1c}

(1 西北农林科技大学 a 生命科学学院, b 资源环境学院, c 林学院, 陕西 杨凌 712100;

2 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

[摘要] 【目的】筛选能够表征土壤肥力水平的酶类和参数。【方法】采用非缓冲液法,对采自渭北旱塬陕西长武县农田 19 个土样的 10 项生化指标(转化酶、纤维素酶、淀粉酶、蛋白酶、脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶、脱氢酶、尿酸盐酶和土壤呼吸强度)进行测定;并采用相关和主成分分析法,对土壤酶活性、土壤呼吸强度之间及其与土壤化学性质间的相关性和主成分综合得分进行评判;最后采用土壤酶总体酶活性参数(TEI、TEI₅)对 19 个供试土样的肥力进行评价,并分析了其与土壤化学性质的相关性。【结果】土壤转化酶、脲酶、脱氢酶、土壤呼吸强度对土壤环境条件的改变较为敏感;10 项土壤生化指标中,仅转化酶、脲酶、磷酸酶、脱氢酶活性和土壤呼吸强度之间及其与大多数理化性质间呈显著或极显著相关,揭示此 5 项生化指标与土壤化学性质关系密切,且在一定程度上可指示土壤肥力水平的高低;构建的总体酶活性参数 TEI 和 TEI₅,与土壤酶活性、土壤呼吸强度及土壤化学性质主成分分析获得的土壤肥力综合得分均达极显著正相关。【结论】土壤总体酶活性参数 TEI 和 TEI₅ 可作为表征土壤肥力的重要指标,并能反映土壤整体酶活性和呼吸强度的高低。

[关键词] 土壤酶;总体酶活性;土壤肥力;主成分分析;变异系数

[中图分类号] S154.2

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2011)04-0139-08

Study on soil biochemical activity characteristics in Weibei arid region

TAN Xiang-ping^{1a,1b}, KONG long^{1b}, HE Wen-xiang^{1b},
WANG Xu-dong^{1b}, HAO Ming-de², TANG Ming^{1c}

(1 a College of Life Sciences, b College of Resources and Environment, c College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 The study was to detect the enzyme types and enzyme index indicating soil fertility level. 【Method】 This experiment investigated ten soil biochemical properties (invertase, cellulase, amylase, proteinase, urease, phosphatase, catalase, dehydrogenase, uricase and respiration intensity) in Weibei arid area by using no-buffer method. The data was processed with the methods of correlation analysis, principle component. Finally, the total enzyme index (TEI, TEI₅) were used to estimate soil fertility of 19 soil samples, and the relationship between them and soil chemical properties were analyzed by correlation analysis. 【Result】 The results showed that soil invertase, urease, phosphatase, dehydrogenase and respiration intensity were more sensitive to environmental change among these ten biochemical properties. There was a significant correlation between invertase, urease, phosphatase, dehydrogenase and respiration, and also between these five soil biochemical properties and most of soil chemical properties. This indicated that these

* [收稿日期] 2010-09-26

[基金项目] 中国科学院知识创新工程重大项目(KSCX-YW-09-07);西北农林科技大学“青年学术骨干人才支持”计划项目;长江学者和创新团队发展计划项目(IRT0748)

[作者简介] 谭向平(1984—),男,土家族,湖北巴东人,硕士,主要从事土壤生物化学研究。E-mail:zzrtxp@163.com

[通信作者] 和文祥(1968—),男,陕西黄龙人,教授,博士,博士生导师,主要从事土壤生态毒理及土壤生物化学研究。E-mail:wxe1968@163.com

five soil biochemical properties can be used as indicators for soil fertility. Among total enzyme activity parameters TEI and TEI₅ obtained in this experiment, TEI and TEI₅ had a significant positive correlation with chemical properties with TEI₅ as the most significant. By processing the data of soil enzyme activities, respiration intensity and chemical properties in principal component analysis, the soil information system obtained in this experiment can better show the variation of soil fertility and the multiple scores were significantly positively correlated with TEI and TEI₅. **【Conclusion】** This indicated that TEI and TEI₅ can be used to monitor soil fertility levels and total enzyme activity and respiration intensity.

Key words: soil enzyme; total enzyme activity; soil fertility; principle component analysis; variability coefficient

酶作为土壤的三大组分之一,参与了土壤中发生的所有生化反应,在营养物质转化、能量转移、环境保护、污染监测和修复等方面发挥着重要作用^[1],故被国际著名土壤生物化学家 Tabatabai 等称为土壤生态系统的核心^[2]。其中土壤酶与土壤肥力的关系,是近 30 年来国内外学者关注的重要课题之一,先后提出了土壤脲酶、转化酶、磷酸酶、脱氢酶、 β -葡萄糖苷酶等土壤肥力指标^[3-4],但由于自然条件、土壤类型、耕作措施、种植作物种类等的差异,导致研究结果并不一致。如 Riffaldi 等^[5]发现,过氧化氢酶可表征土壤肥力水平的高低;而樊军等^[6]却认为,过氧化氢酶和蔗糖酶不能作为土壤肥力指标。目前还很难获得一个较为通用的表征土壤肥力的酶指标。另据报道,非缓冲液法测定的土壤酶活性较缓冲液

法更接近土壤实际酶状况^[7]。为此,本研究采用非缓冲液法,较系统地研究了渭北旱塬典型区域——长武县土壤酶活性的特征及土壤生化活性的变化规律,筛选对土壤肥力等变化敏感的酶类和参数,旨在为评价土壤肥力水平、完善土壤酶学理论、促进农业可持续发展提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

2008-09 在陕西省长武县采集土样,土壤为中壤质黑垆土(堆垫干润均腐土, Cumuli-Ustic Isohumosols)^[8]。先去除 0~5 cm 表层土后,采集 5~20 cm 土层土样,混匀风干、过孔径 1 mm 尼龙筛备用。采用常规方法测定土壤性质^[9],结果见表 1。

表 1 供试土壤的化学性质

Table 1 Chemical property of soils tested

土样编号 No.	经度 Longitude	纬度 Latitude	有机质/ (g·kg ⁻¹) OM	全氮/ (g·kg ⁻¹) T. N	全磷/ (g·kg ⁻¹) T. P	全钾/ (g·kg ⁻¹) T. K	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹) A. N	速效磷/ (mg·kg ⁻¹) A. P	速效钾/ (mg·kg ⁻¹) A. K	pH
1	107°54.890'	35°13.863'	15.39	1.00	0.82	21.90	54.25	16.16	295.74	8.23
2	107°55.600'	35°11.795'	13.91	0.99	0.97	21.90	40.25	8.05	262.35	8.39
3	107°55.543'	35°12.800'	11.34	0.95	0.94	22.83	38.50	4.74	87.11	8.39
4	107°55.540'	35°12.793'	11.46	1.07	0.90	23.80	40.25	10.67	174.64	8.44
5	107°52.716'	35°13.144'	12.84	0.96	0.73	21.30	49.00	7.33	101.50	8.07
6	107°50.023'	35°13.978'	14.60	1.00	0.91	23.82	56.00	13.40	220.56	8.21
7	107°50.023'	35°13.985'	12.66	0.98	0.74	20.68	47.25	9.25	208.21	8.32
8	107°50.021'	35°15.612'	11.76	0.91	0.74	19.51	40.25	14.62	129.08	8.35
9	107°50.161'	35°16.037'	18.09	1.27	0.74	20.93	63.00	17.74	274.11	8.44
10	107°50.295'	35°16.214'	8.63	0.67	0.74	21.06	33.25	13.96	268.88	8.70
11	107°47.572'	35°16.330'	11.65	0.99	0.80	20.23	47.25	9.65	299.34	8.42
12	107°47.922'	35°15.307'	14.42	1.03	0.79	21.51	38.50	20.72	286.15	8.15
13	107°45.799'	35°17.862'	9.63	0.78	0.92	20.90	38.50	5.84	117.09	8.67
14	107°45.797'	35°17.870'	11.17	0.89	1.27	22.49	45.50	12.03	323.32	8.53
15	107°45.415'	35°16.830'	10.74	0.79	0.69	21.88	38.50	9.76	360.49	8.47
16	107°45.407'	35°16.954'	11.09	1.03	0.73	19.34	43.75	9.29	343.70	8.41
17	107°45.425'	35°16.950'	8.66	0.64	0.70	16.68	31.50	8.36	151.86	8.33
18	107°45.368'	35°15.562'	14.93	1.24	0.76	21.60	57.75	11.89	121.89	7.93
19	107°45.387'	35°15.058'	13.49	0.96	0.91	19.85	52.50	15.80	96.71	8.20

1.2 测定指标及其方法^[10-11]

土壤转化酶(Invertase INA)、纤维素酶(Cellu-

lase CEA)、淀粉酶(Amylase AMA)活性采用 3,5-二硝基水杨酸法测定,土壤蛋白酶(Protease PRA)

活性采用茚三酮法测定,土壤脲酶(Urease URE)活性采用靛酚蓝法测定,土壤磷酸酶(Phosphatase PHA)活性采用磷酸苯二钠法测定,土壤脱氢酶(Dehydrogenase DHA)活性采用 TTC 法测定,土壤尿酸盐酶(Uricase URI)活性采用尿酸盐法测定,土壤过氧化氢酶(Catalase CAT)活性和土壤呼吸强度(Respiration intensity RESP)采用高锰酸钾和盐酸滴定法测定。各土壤酶活性分别以每克干土每小时生成葡萄糖、麦芽糖、葡萄糖、NH₂-N、NH₃-N、pH(OH)、TPF、尿酸的量及消耗 0.05 mol/L 高锰酸钾的体积(mL)表示。土壤呼吸强度单位为每克干土每天生成 CO₂ 的质量。

1.3 数据处理

采用 EXCEL 和 DPS 7.05 软件对数据进行相关系数和多重比较等计算与分析。

总体酶活性参数 TEI (The total enzyme index) = $\sum_{i=1}^j X_i / \bar{X}_i$; 其中, X_i 为第 i 种土壤酶活性, \bar{X}_i

为第 i 种酶活性的平均值^[12]。

2 结果与分析

2.1 土壤生化活性的变化特征

从表 2 可以看出,在土壤水解酶中,影响碳素循环的转化酶、纤维素酶和淀粉酶活性平均值分别为 368.66, 15.11 和 72.21 μg/(g·h),变化于 139.20~604.60, 9.29~20.83 和 51.85~127.96 μg/(g·h),最大值是最小值的 2.24~4.34 倍;影响氮素循环的脲酶、蛋白酶活性平均值分别为 45.71 和 5.62 μg/(g·h),变化于 13.02~89.17 和 3.37~8.40 μg/(g·h),其中脲酶最大值是最小值的 6.85 倍;土壤磷酸酶是有机磷转化为无机磷的催化剂,且在土壤磷的有效化和清除土壤有机磷农药污染中发挥着重要作用^[13],其活性平均值为 32.66 μg/(g·h),变化于 21.97~42.65 μg/(g·h),最大值是最小值的 1.94 倍。

表 2 渭北旱塬供试土壤生化活性的测定结果

Table 2 Soil biochemical activities in Weibei arid regions

土样 编号 No.	水解酶 Hydrolytic enzyme					氧化还原酶 Oxidoreductase				呼吸强度/ (μg·g ⁻¹ · d ⁻¹) RESP
	转化酶/ (μg·g ⁻¹ · h ⁻¹)	纤维素酶/ (μg·g ⁻¹ · h ⁻¹)	淀粉酶/ (μg·g ⁻¹ · h ⁻¹)	蛋白酶/ (μg·g ⁻¹ · h ⁻¹)	脲酶/ (μg·g ⁻¹ · h ⁻¹)	磷酸酶/ (μg·g ⁻¹ · h ⁻¹)	过氧化氢酶/ (mL·g ⁻¹ · h ⁻¹)	脱氢酶/ (μg·g ⁻¹ · h ⁻¹)	尿酸盐酶/ (μg·g ⁻¹ · h ⁻¹)	
	INA	CEA	AMA	PRA	URE	PHA	CAT	DHA	URI	
1	424.04	17.29	76.94	4.40	44.41	37.43	13.65	0.97	15.25	499.68
2	479.69	16.49	73.42	3.37	39.66	32.91	15.53	0.97	21.47	404.63
3	399.82	17.53	127.96	6.38	33.25	26.84	14.78	0.60	18.79	458.94
4	432.95	16.25	79.02	6.38	49.86	29.52	12.90	0.74	16.24	195.53
5	311.67	20.83	54.55	6.59	59.82	34.65	13.28	1.18	13.56	544.94
6	465.40	12.12	94.36	7.61	67.00	39.74	15.38	1.39	14.12	562.13
7	518.34	15.21	74.87	5.58	47.64	32.48	12.60	1.05	27.69	304.15
8	234.08	12.98	57.24	5.27	15.46	37.29	13.43	0.98	9.28	445.36
9	240.79	9.29	60.46	6.47	87.05	42.18	14.85	1.83	14.12	988.49
10	296.29	19.44	69.89	4.21	23.74	26.62	15.90	0.95	23.48	608.30
11	439.61	20.32	60.56	5.50	29.61	30.38	14.40	0.89	16.04	382.00
12	604.40	11.72	81.92	5.16	80.36	40.49	14.55	1.68	14.69	581.14
13	165.39	15.69	66.99	6.53	25.09	22.10	15.38	0.58	15.65	553.99
14	213.17	10.87	62.63	3.85	89.17	25.80	13.50	0.59	10.87	282.43
15	286.68	17.37	76.11	8.40	38.06	27.68	14.25	0.78	16.24	296.00
16	350.00	11.23	58.49	6.64	13.18	33.90	14.40	0.98	12.73	391.05
17	139.20	12.42	51.85	3.45	13.02	21.97	11.48	0.58	14.32	268.85
18	522.05	13.30	80.26	5.31	44.69	42.65	14.25	1.14	19.07	599.25
19	481.05	16.74	64.50	5.67	67.43	35.97	13.58	0.83	13.27	553.99
均值 Mean	368.66	15.11	72.21	5.62	45.71	32.66	14.11	0.99	16.15	469.52
变异系数/ % C. V.	36.01	22.22	24.09	24.18	52.60	19.70	7.93	35.53	27.20	38.03

氧化还原酶在土壤有机质形成、能量转移等过程中发挥作用。由表 2 可知,供试土壤过氧化氢酶、脱氢酶及尿酸盐酶活性均值分别为 14.11 mL/(g·h) 和 0.99, 16.15 μg/(g·h),变化于

11.48~15.90 mL/(g·h) 及 0.58~1.83, 9.28~27.69 μg/(g·h),其中脱氢酶最大值是最小值的 3.18 倍。

土壤呼吸强度是表征微生物活性的重要指标,

供试土壤呼吸强度的均值为 469.52 $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{d})$,变化于 195.53~988.49 $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{d})$,最大值是最小值的 5.06 倍。

变异系数是反映试验观测值变异程度的一个统计量^[14]。由表 2 还可知,土壤脲酶、转化酶、脱氢酶活性和呼吸强度的变异系数均较大,过氧化氢酶活性的最小,其中脲酶活性变异系数为转化酶、过氧化氢酶活性的 1.46 和 6.63 倍,揭示在本地区农田土壤中,脲酶、转化酶、脱氢酶、土壤呼吸强度对土壤环境状况变化较敏感,其中以脲酶最敏感,过氧化氢酶最迟钝。

表 2 表明,不同条件下土壤酶活性差异较大,而且不同种类酶活性的变化规律有所差异,特别是水解酶类和氧化还原酶类间。如土壤水解酶中,8、17、10、14 号土样至少有 5 个酶的活性均低于平均值,4、6、19 号土样的水解酶表现则相反;氧化还原酶中,只有 18 号土样的 3 种酶活性均高于平均值,8、

14、17 号土样的 3 种酶活性和呼吸强度均小于各自的平均值。反映出酶活性在一定程度上可表明土壤肥力水平间的差异,但由于土壤酶来源、性质等的不同,导致其与土壤肥力的变化规律不完全一致,因此在采用单一酶活性判断土壤肥力水平高低时有一定的偏差。如 11 号土样,其纤维素酶活性位居第 2 位,而脲酶活性位于第 14 位;19 号土样水解酶活性较高,而氧化还原酶活性较低。可见,对土壤酶指标体系有待进一步完善。

2.2 土壤生化活性与其化学性质的相关分析

土壤生化活性指标间的相关分析结果见表 3。表 3 显示,仅转化酶与磷酸酶,脲酶与脱氢酶、磷酸酶,磷酸酶与脱氢酶、呼吸强度,呼吸强度与过氧化氢酶、脱氢酶间呈显著或极显著正相关,其余生化活性指标间的相关均未达到显著水平。表明不同土壤酶类由于性质等的不同,导致其相关关系存在差异。

表 3 渭北旱塬不同土壤生化活性指标间的相关系数

Table 3 Correlation coefficient among soil biochemical activities in Weibei arid region

项目 Item	转化酶 INA	纤维素酶 CEA	淀粉酶 AMA	蛋白酶 PRA	脲酶 URE	磷酸酶 PHA	过氧化氢酶 CAT	脱氢酶 DHA	尿酸盐酶 URI
转化酶 INA	1.00								
纤维素酶 CEA	0.13	1.00							
淀粉酶 AMA	0.45	0.11	1.00						
蛋白酶 PRA	0.03	0.05	0.26	1.00					
脲酶 UR	0.29	-0.31	0.09	0.08	1.00				
磷酸酶 PHA	0.57*	-0.32	0.04	0.16	0.45*	1.00			
过氧化氢酶 CAT	0.15	0.09	0.34	0.2	0.05	0.15	1.00		
脱氢酶 DHA	0.38	-0.37	-0.03	0.19	0.53*	0.83**	0.28	1.00	
尿酸盐酶 URI	0.39	0.37	0.34	-0.15	-0.17	-0.14	0.18	-0.03	1.00
呼吸强度 RESP	0.02	-0.21	0.00	0.14	0.37	0.57**	0.52*	0.71**	-0.07

注:自由度 $n-2=17$, $r_{0.05}=0.456$, $r_{0.01}=0.575$ 。表 4 和表 9 同。

Note: Freedom $n-2=17$, $r_{0.05}=0.456$, $r_{0.01}=0.575$. It is the same with table 4 and table 9.

表 4 渭北旱塬土壤生化活性与化学性质的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between soil biochemical activities and chemical properties of soils in Weibei arid region

项目 Item	转化酶 INA	纤维素酶 CEA	淀粉酶 AMA	蛋白酶 PRA	脲酶 URE	磷酸酶 PHA	过氧化氢酶 CAT	脱氢酶 DHA	尿酸盐酶 URI	呼吸强度 RESP
有机质 OM	0.49*	-0.31	0.13	0.12	0.64**	0.87**	0.17	0.77**	-0.08	0.61**
全氮 T.N	0.53*	-0.31	0.16	0.22	0.49*	0.80**	0.12	0.62**	-0.05	0.43
全磷 T.P	-0.01	-0.13	0.23	-0.26	0.43	-0.24	0.15	-0.35	-0.18	-0.21
全钾 T.K	0.40	0.13	0.64**	0.34	0.48*	0.19	0.43	0.14	0.15	0.04
碱解氮 A.N	0.30	-0.23	-0.01	0.25	0.56*	0.74**	0.08	0.55*	-0.14	0.56
速效磷 A.P	0.28	-0.40	-0.14	-0.13	0.52*	0.65**	0.08	0.66**	-0.26	0.48*
速效钾 A.K	0.03	-0.19	-0.17	-0.02	0.14	0.03	0.24	0.21	0.00	-0.09
pH	-0.56*	0.08	-0.10	-0.04	-0.28	-0.69**	0.30	-0.41	0.11	-0.15

由土壤生化活性指标与化学性质指标的相关分析结果(表 4)可知,土壤脲酶、磷酸酶、脱氢酶活性与土壤有机质、全氮、碱解氮、速效磷含量间呈显著或极显著正相关;转化酶活性与土壤有机质、全氮含

量呈显著正相关,与 pH 显著负相关;呼吸强度与土壤有机质、速效磷含量间呈显著或极显著正相关;淀粉酶活性与土壤全钾含量呈极显著正相关;纤维素酶、蛋白酶、尿酸盐酶、过氧化氢酶与土壤任一化学

性质指标的相关性均不显著。这主要是由于不同土壤酶类的来源、存在状态、性质及环境条件等不同造成的,因此同一种酶类活性在不同生态区也表现出明显差异,这也佐证了作者关于不同生态区土壤酶活性应该区分开来分析的结论^[15]。

由以上研究结果可知,在渭北旱塬土壤中,土壤脲酶、磷酸酶、脱氢酶、转化酶活性和土壤呼吸强度与土壤化学性质关系密切,在一定程度上可作为土壤肥力的监测指标之一;同时反映出作为土壤碳、氮、磷循环的作用酶类,它们在土壤生化活性中占据

有比较重要的地位。

2.3 土壤生化活性及化学性质的主成分分析

主成分的作用是降维,通过分析筛选出表征土壤肥力系统的主要因子群,并在此基础上对样品进行聚类。根据主成分分析原理^[16],当累积方差贡献率大于 85% 时,即可用于反映系统的变异信息。由表 5 看出,采用土壤化学性质和生化活性主成分分析获得的前 7 个主成分的累积方差贡献率达 87.56%,因此其可表征农田土壤肥力系统的变异信息。

表 5 渭北旱塬土壤主成分的特征根

Table 5 Principle component eigenvalues of the soil in Weibei arid region

主成分 PC	特征值 Eigenvalue	方差贡献率/% Percentages	累积方差贡献率/% Sum percentages
1	6.280	34.89	34.89
2	2.632	14.62	49.51
3	1.998	11.10	60.61
4	1.710	9.50	70.11
5	1.371	7.62	77.73
6	1.014	5.63	83.36
7	0.757	4.20	87.56

由表 6 可知,肥力信息系统中第 1 主成分主要综合了磷酸酶、脱氢酶、有机质、全氮的信息;第 2 主成分则主要包含了全钾信息;第 3 主成分主要包含了脲酶、全磷、pH 信息;第 4 主成分主要包含了过

氧化氢酶信息;第 5 主成分综合了转化酶、蛋白酶、尿酸盐酶、速效磷的信息;第 6 主成分主要包含了呼吸强度、速效钾的信息;第 7 主成分则主要包含了纤维素酶、淀粉酶、碱解氮的信息。

表 6 渭北旱塬土壤生化活性及土壤化学性质的主成分系数矩阵

Table 6 Principal component coefficient matrix of biochemical activities and chemical properties of soils in Weibei arid region

项目 Item	主成分 1 PC1	主成分 2 PC2	主成分 3 PC3	主成分 4 PC4	主成分 5 PC5	主成分 6 PC6	主成分 7 PC7
有机质 OM	0.378	-0.006	-0.012	-0.048	0.014	-0.064	0.126
全氮 T. N	0.339	0.056	-0.072	-0.108	-0.065	0.074	0.104
全磷 T. P	-0.022	0.246	0.446	-0.446	0.028	-0.237	0.075
全钾 T. K	0.144	0.490	0.198	-0.098	-0.078	0.138	0.061
碱解氮 A. N	0.327	-0.033	-0.015	-0.095	-0.187	-0.045	0.415
速效磷 A. P	0.260	-0.216	0.176	0.063	0.287	0.004	-0.199
速效钾 A. K	0.037	-0.036	0.363	0.230	0.398	0.561	0.195
pH	-0.236	0.066	0.424	0.297	0.003	-0.018	0.090
转化酶 INA	0.220	0.284	-0.279	-0.084	0.375	0.133	-0.091
纤维素酶 CEA	-0.143	0.263	-0.293	0.142	0.009	-0.087	0.599
淀粉酶 AMA	0.061	0.502	-0.061	-0.032	-0.067	-0.024	-0.522
蛋白酶 PRA	0.086	0.154	-0.054	0.196	-0.593	0.524	-0.014
脲酶 URE	0.272	0.058	0.287	-0.257	0.034	-0.037	0.179
磷酸酶 PHA	0.373	-0.086	-0.139	0.027	0.037	0.036	-0.073
过氧化氢酶 CAT	0.095	0.290	0.261	0.480	-0.050	-0.222	-0.061
脱氢酶 DHA	0.341	-0.117	-0.002	0.259	0.081	0.035	-0.095
尿酸盐酶 URI	-0.043	0.315	-0.257	0.246	0.403	-0.149	0.129
呼吸强度 RESP	0.261	-0.094	0.086	0.365	-0.204	-0.471	0.003

根据特征值和因子载荷量,得到反映土壤肥力系统的 1~7 主成分函数表达式,将标准化数据分别代入后,获得土壤肥力信息系统中各个样品在主成分上的得分(表 7),然后计算主成分综合得分值并

排序,即可评价肥力水平^[16-17]。由表 7 可知,供试土壤主成分综合得分的大小顺序为 9 号>6 号>12 号>18 号>1 号>2 号>19 号>7 号>11 号>4 号>14 号>5 号>16 号>15 号>3 号>10 号>8

号>13号>17号。

表 7 渭北旱塬供试土壤 7 个主成分因子的得分

Table 7 Principal component values by PCA of Weibei arid region soils tested

土样编号 No.	$Y(i,1)$	$Y(i,2)$	$Y(i,3)$	$Y(i,4)$	$Y(i,5)$	$Y(i,6)$	$Y(i,7)$	综合得分(排名) Multiple score(order)
1	1.682	-0.120	-0.202	-0.418	1.047	0.066	0.720	0.62(5)
2	-0.199	1.603	0.289	0.131	1.885	-1.005	0.453	0.32(6)
3	-1.515	3.719	-0.691	-0.398	-1.351	-0.876	-1.380	-0.31(15)
4	-0.827	1.574	-0.102	-1.610	-0.172	1.201	0.067	-0.17(10)
5	0.494	-0.578	-1.865	-0.430	-1.663	-0.281	1.608	-0.23(12)
6	3.246	1.579	0.776	-0.001	-1.116	0.576	-0.801	1.36(2)
7	-0.127	0.732	-2.032	-0.246	1.556	0.547	0.407	-0.02(8)
8	-0.690	-2.558	-0.382	-0.103	-0.780	-0.190	-1.044	-0.78(17)
9	5.407	-2.080	1.820	1.674	-1.055	-0.639	0.463	1.85(1)
10	-2.735	0.669	0.731	3.169	1.570	-1.267	0.093	-0.42(16)
11	-0.901	0.112	-0.507	0.641	0.546	0.600	1.516	-0.15(9)
12	3.473	-0.341	0.363	0.238	1.866	0.439	-1.739	1.32(3)
13	-3.305	0.545	1.177	1.027	-1.975	-1.211	0.054	-1.06(18)
14	-1.246	-0.114	4.100	-2.991	0.595	-0.070	0.541	-0.22(11)
15	-1.895	0.707	0.305	1.347	-0.718	2.555	0.250	-0.30(14)
16	-0.631	-1.485	0.178	0.970	-0.288	1.729	-0.465	-0.27(13)
17	-4.833	-3.565	-1.121	-1.026	0.443	-0.439	-0.930	-2.46(19)
18	3.352	0.300	-2.184	-0.659	-0.074	-0.732	-0.266	0.85(4)
19	1.249	-0.699	-0.654	-1.316	-0.318	-1.003	0.453	0.07(7)

经计算,土壤主成分综合得分与土壤有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾、pH 的相关系数分别为 0.876**, 0.784**, 0.067, 0.571*, 0.724**, 0.599**, 0.284, -0.371, 表明采用土壤生化活性和土壤化学性质构建的土壤肥力信息系统,可表征土壤肥力水平的高低。

2.4 土壤酶总体活性指标的计算及其与土壤化学性质的相关分析

由于单个土壤酶与土壤理化性质间的关系不一致,加之主成分分析等方法的计算较为繁琐,故本研究构建并计算了土壤酶总体活性参数(Soil total enzyme index, TEI),其中 TEI_5 为与土壤理化性质密切相关的 5 项生化活性指标(脲酶、磷酸酶、脱氢酶、转化酶和呼吸强度)的统计参数,结果见表 8。从表 8 可以看出,TEI、 TEI_5 分别为 6.35~12.34 和 2.49~7.80,其中 8、14、17 号土样的 TEI、 TEI_5 值均较低,6、9、12 号土样的 TEI、 TEI_5 值则均较高。供试土样 TEI_5 的顺序为 9 号>12 号>6 号>18 号>19 号>5 号>1 号>7 号>2 号>14 号>11 号>10 号>4 号>3 号>16 号>8 号>15 号>13 号>17 号。可见,由土壤酶总体活性参数得到的结果与主成分分析获得的结果基本一致,揭示土壤酶总体活性参数在一定程度上可以反映土壤肥力水平的差异。

表 8 渭北旱塬供试土壤的酶总体活性指标

Table 8 Soil total enzyme index in soils in Weibei arid region tested

土样编号 Soil No.	TEI	TEI_5
1	10.22	5.32
2	10.16	5.02
3	10.50	4.22
4	9.55	4.33
5	10.66	5.57
6	11.98	6.55
7	10.80	5.15
8	8.17	4.05
9	12.33	7.80
10	9.98	4.39
11	9.66	4.49
12	12.34	7.57
13	8.62	3.44
14	8.42	4.52
15	9.58	3.87
16	8.64	4.10
17	6.35	2.49
18	11.26	6.13
19	10.69	5.90

相关分析(表 9)发现,TEI、 TEI_5 与有机质、全氮、碱解氮、速效磷含量达显著或极显著正相关,而且 TEI 还与全钾含量呈显著正相关;此外,经计算,TEI、 TEI_5 与综合得分的相关系数分别为 0.909** 和 0.927**, 均呈极显著相关,表明 TEI 指标与主成分构建的土壤肥力信息系统可一起作为评价土壤肥力水平的指标,而且采用总体酶活性参数进行评

价具有更简便、实用的优点。

表9 渭北旱塬土壤酶总体活性指标与土壤化学性质的相关性

Table 9 Correlation coefficients between soil total enzyme index and chemical properties of soils in Weiwei arid region tested

项目 Item	TEI	TEI ₅
有机质 OM	0.77**	0.88**
全氮 T. N	0.66**	0.73**
全磷 T. P	-0.06	-0.02
全钾 T. K	0.55*	0.37
碱解氮 A. N	0.61**	0.71**
速效磷 A. P	0.46*	0.68**
速效钾 A. K	0.04	0.10
pH	-0.43	-0.51*

3 讨论

酶是土壤重要的组成部分,水解酶和氧化还原酶是土壤酶中主要的2大类,其与土壤肥力的关系一直是研究人员关注的课题之一。国内外学者先后提出了一些酶指标,如水解酶中的脲酶、转化酶、磷酸酶等,以及氧化还原酶中的脱氢酶等,他们认为由于土壤酶具有以下优点,因此可用来作为潜在的土壤肥力指标:(1)土壤肥力的主要物理和化学参数与土壤酶活性密切相关;(2)与其他性质相比,土壤酶能在较短时间内反映出外界变化对土壤品质的影响效应;(3)土壤酶活性是土壤的一个综合性生物参数指标;(4)土壤酶活性的测定方法简单易行,而且重现性好,样品准备时间也短,较易推广^[3-5]。但也有部分学者获得了不同的结果,因此,十分有必要进一步开展土壤肥力酶指标的研究。

本研究提出并构建了土壤总体酶活性参数 TEI 的计算方法,该参数与由土壤化学性质、主成分分析得到的综合得分间达极显著正相关,揭示出相对于单一的酶活性指标,TEI 在表征土壤肥力水平时更具有优势,也更准确。今后需开展选择合适土壤酶的研究,以使针对某方面的酶总体活性计算结果更为合理,如在土壤肥力方面应包括哪几种主要营养物质转化的作用酶类,在污染程度监测方面应包括哪几种主要的敏感酶类等。

4 结论

本试验对渭北旱塬农田土壤中10项土壤生化指标进行了系统研究,发现土壤脲酶、转化酶、脱氢酶、土壤呼吸强度对土壤环境条件的改变更敏感;在供试土壤的10项生化指标中,仅脲酶、转化酶、磷酸

酶、脱氢酶和呼吸强度间及其与大多数理化性质间均达显著或极显著水平,揭示此5项生化指标与土壤化学性质关系密切,且在一定程度上可指示土壤肥力水平的高低;对土壤生化活性与化学性质进行主成分分析后,获得的土壤信息系统可较好地表征本地区土壤肥力的变异状况;计算获得的酶活性指标 TEI 和 TEI₅,与由化学性质和土壤生化活性得到的土壤肥力综合得分均呈极显著正相关,尤以 TEI₅ 为佳,揭示出土壤总体酶活性参数 TEI 是反映土壤肥力水平高低的重要指标。

[参考文献]

- [1] Bastida F, Zsolnay A, Hernández T, et al. Past, present and future of soil quality indices: A biological perspective [J]. *Geoderma*, 2008, 147: 159-171.
- [2] Tabatabai M A, Dick W A. Enzymes in soil research and developments in measuring activities [M]// Burns R G, Dick R P. *Enzymes in the environment, activity, ecology and applications*. New York: Marcel Dekker Inc, 2002: 567-595.
- [3] Tabatabai M A. Effects of trace elements on urease activity in soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1997, 9(1): 9-13.
- [4] Trasar-Cepeda C. Towards a biochemical quality index for soils: An expression relating several biological and biochemical properties [J]. *Biol Fertil Soils*, 1998, 26: 100-106.
- [5] Riffaldi R, Saviozzi A, Levi-Minzi R, et al. Biochemical properties of a mediterranean soil as affected by long-term crop management systems [J]. *Soil & Tillage Research*, 2002, 67: 109-114.
- [6] 樊军, 郝明德. 黄土高原旱地轮作与施肥长期定位试验研究. II: 土壤酶活性与土壤肥力 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(2): 146-150.
Fan J, Hao M D. Study on long-term experiment of crop rotation and fertilization in the Loess Plateau. II: Relationship between soil enzyme activities and soil fertility [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(2): 146-150. (in Chinese)
- [7] Burns R G. *Soil enzymes* [M]. New York: Academic Press, 1978.
- [8] 王宗明, 梁银丽. 黄土塬区作物生产潜力分析: 以长武武区为例 [J]. *水土保持通报*, 2002, 22(1): 30-33.
Wang Z M, Liang Y L. Analysis of crop potential productivity on highland of Loess Plateau [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2002, 22(1): 30-33. (in Chinese)
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao S D. *Agricultural chemistry analysis for soil* [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000. (in Chinese)
- [10] 关松荫. 土壤酶及其研究法 [M]. 北京: 农业出版社, 1987.
Guan S Y. *Soil enzymes and research* [M]. Beijing: Agricultural Publishing House, 1987. (in Chinese)
- [11] 程丽娟, 薛泉宏. 微生物学实验技术 [M]. 北京: 世界图书出版社, 2000.

- Cheng L J, Xue Q H. Microbiology laboratory technicians [M]. Beijing: World Book Press, 2000. (in Chinese)
- [12] 和文祥, 谭向平, 王旭东, 等. 土壤总体酶活性指标的初步研究 [J]. 土壤学报, 2010, 47(6): 211-215.
- He W X, Tan X P, Wang X D, et al. Study on total enzyme activity index in soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(6): 211-215. (in Chinese)
- [13] Trasar-Cepeda M C, Gil-Sotres F. Kinetics of acid phosphatase activity in various soils of Galicia (NW Spain) [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1988, 20(3): 275-280.
- [14] 刘梦云, 常庆瑞, 齐雁冰, 等. 宁南山区不同土地利用方式土壤酶活性特征研究 [J]. *中国生态农业学报*, 2006, 14(3): 67-70.
- Liu M Y, Chang Q R, Qi Y B, et al. Features of soil enzyme activity under different land uses in Ningnan Mountain area [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14(3): 67-70. (in Chinese)
- [15] 和文祥, 朱铭莪. 陕西土壤脲酶活性与土壤肥力关系分析 [J]. *土壤学报*, 1997, 34(4): 392-397.
- He W X, Zhu M E. Relationship between urease activity and fertility of soils in Shaanxi Province [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1997, 34(4): 392-397. (in Chinese)
- [16] 袁志发, 周静芋. 多元统计分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- Yuan Z F, Zhou J Y. Multivariate statistical analysis [M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)
- [17] 唐玉姝, 慈恩, 颜廷梅, 等. 太湖地区长期定位试验稻麦两季土壤酶活性与土壤肥力关系 [J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 999-1006.
- Tang Y S, Ci E, Yan T M, et al. Relationship between soil enzyme activity and soil fertility of paddy fields under wheat-rice cropping system in a long term experiment in Taihu lake region [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 999-1006. (in Chinese)

(上接第 138 页)

- [20] 陈洪松, 王克林, 邵明安. 黄土区人工林草植被深层土壤干燥化研究进展 [J]. *林业科学*, 2005, 41(4): 154-161.
- Chen H S, Wang K L, Shao M A. A review on the effect of vegetation rehabilitation on the desiccation of deep soil layer on the Loess Plateau [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 41(4): 154-161. (in Chinese)
- [21] 孙长忠, 黄宝龙, 陈海滨, 等. 黄土高原人工植被与其水分环境相互作用关系研究 [J]. *北京林业大学学报*, 1998, 20(3): 7-14.
- Sun C Z, Huang B L, Chen H B, et al. In the teraction between soil water conditions and different kinds of artificial plant cover in the Loess Plaeau [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 1998, 20(3): 7-14. (in Chinese)
- [22] 杨文治. 黄土高原土壤水资源与植树造林 [J]. *自然资源学报*, 2001, 16(5): 433-438.
- Yang W Z. Soil water resources and afforestation in Loss Plateau [J]. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(5): 433-438. (in Chinese)
- [23] 景可, 郑粉莉. 黄土高原植被建设的经验教训与前景分析 [J]. *水土保持研究*, 2004, 11(4): 25-27, 178.
- Jing K, Zheng F L. Experiential lesson and perspective of vegetation construction on the Loess Plateau [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11(4): 25-27, 178. (in Chinese)
- [24] Zhao J B, Du J, Chen B Q. Dried earth layers of artificial forestland in the Loess Plateau of Shaanxi Province [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2007, 17(1): 114-126.