

土壤生态能概念的构建及其在障碍土壤判断上的应用

黄紫洋^{1*}, 钟云峰², 肖自军²

¹福建师范大学化学与材料学院, 福建 福州

²福建洋屿环保科技股份有限公司, 福建 泉州

收稿日期: 2022年5月25日; 录用日期: 2022年6月28日; 发布日期: 2022年7月5日

摘要

土壤生态能是指某一单元土壤体系中维持其土壤生态系统健康的能力, 其概念的建立是为了全面研究土壤生态系统健康状态及其变化方向和限度而定义的热力学状态函数。土壤生态能包括土壤内能、土壤熵值、水分渗透压能、比表面张力能、离子化学势、土壤胶体吸附能等土壤体系的理化性质, 其加和结果即为土壤生态能值。土壤生态能值的变化相当于土壤体系与外界环境所发生的输入与输出能值的大小, 表达土壤生态系统健康发展的方向和限度, 可作为障碍土壤调理与改良的判断依据。

关键词

土壤生态能, 土壤生态能值, 土壤生态系统, 障碍土壤

Construction of Soil Ecological Energy Concept as a Criterion in Obstacle Soil

Ziyang Huang^{1*}, Yunfeng Zhong², Zijun Xiao²

¹College of Chemistry and Materials Science, Fujian Normal University, Fuzhou Fujian

²Fujian Yangyu Environmental Protection Technology Co., Ltd., Quanzhou Fujian

Received: May 25th, 2022; accepted: Jun. 28th, 2022; published: Jul. 5th, 2022

Abstract

Soil ecological energy refers to the ability to maintain the health of soil ecosystem in a unit of soil system. The concept of soil ecological energy is defined as a thermodynamic state function to study

*通讯作者。

comprehensively the health state of soil ecosystem and its changing direction and limit. Soil ecological energy includes soil internal energy, soil entropy, water osmotic pressure energy, specific surface tension energy, ionic chemical potential, soil colloid adsorption energy and other physical and chemical properties of the soil system, and the accumulation result is a value of soil ecological energy. A change of the value of soil ecological energy is equal to the input and output energy between the soil system and the external environment, which indicates the direction and limit of the healthy development of the soil ecosystem, and serves as a criterion for the conditioning and improvement of the obstacle soil.

Keywords

Soil Ecological Energy, Value of Soil Ecological Energy, Soil Ecosystem, Obstacle Soil

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

土壤生态能(Soil ecological energy)概念的提出是建立在研究土壤生态学中用于判断土壤生态系统健康状态及其变化方向和限度而首次引入的热力学函数[1], 是在研究土壤体系与外界环境之间有关能量转化过程中所涉及的土壤理化性质物理量方面在能值上变化量。众所周知, 生态是指一切生物的生存状态, 以及它们之间和它与环境之间环环相扣的关系。生态功能则是对生态环境起稳定调节作用的功能, 生态价值指的是空气、水、土地、生物等所具有的价值[2]。一般来说, 生态能指具有生态系统功能的生命活动每个范围在外界条件不变情况下保持自身健康的自我平衡与调节的能力, 因此, 土壤生态能指某一土壤体系中维持其土壤生态系统健康状态的能力。从量化角度分析, 土壤生态能值是指在某一个土壤生态系统发展变化过程中, 土壤体系与外界环境所发生的输入与输出的能值。

本研究所涉及的体系指土壤单位体积单元内的土壤、养分、水分、空气等; 而环境则是指土壤单元以外, 与土壤直接发生联系的所有外界因素, 包括土壤翻耕、种植、施肥、灌溉、除虫、收成等, 这些因素都表现为与土壤生态能值密切相关[3] [4]。在土壤体系的研究中, 土壤胶体微团粒结构和植物根系分别视为体系和环境两个不同固相。

由于我国的人均耕地有限, 必须长年耕作, 并且大量使用农药与化肥, 存在重茬严重等问题, 目前耕地的土壤理化性质已严重恶化, 产生了大量的障碍土壤, 不仅破坏土地资源, 引起自然生态系统的失衡, 而且对人类赖以生存的环境以及社会经济发展造成威胁, 因此土壤结构改良治理是国内土壤生态环境研究亟待解决的问题[5] [6] [7] [8]。然而, 障碍土壤的定义是由于受自然成土因素或人为因素的影响, 而使植物生长产生明显障碍或影响农产品质量安全的土壤, 产生障碍土壤的因素主要包括土壤质地不良、结构差或存在妨碍植物根系生长的不良土层、肥力低下或营养元素失衡、酸化、盐碱、土壤水分过多或不足、有毒物质污染等[3], 这些因素本质上都与土壤生态能相关。

2. 土壤生态能的定义

生态系统的基本功能之一是能量流动, 我们研究土壤生态能也以能量循环为主要研究内容, 它们是系统结构和功能的综合体现。土壤生态系统既是生物与水、气、岩石圈相互交接的重要地带, 又是有机自然界与无机自然界相互结合的中心环节。

土壤生态能的概念是在研究障碍土壤结构调理与改良时提出的。根据前期对障碍土壤结构调理及其土壤生态系统调理和土壤性能的改良等研究中发现大量与土壤热力学相关的概念, 这些与土壤生态环境的健康状况紧密相关, 如土壤内能、生态能、土壤生态能、土壤熵、土壤离子化学势、土壤胶体吸附能等。为了方便对土壤生态环境的研究提出了土壤生态能的概念, 并形成了一定的理论研究基础, 定义了土壤生态能是指土壤内能、生态能、土壤生态能、土壤熵、土壤离子化学势、土壤胶体吸附能等土壤热力学概念的集合。通过对土壤生态能及其变化规律的研究, 发现土壤生态能值可以明确地表达出土壤生态系统中的热量平衡、能量守恒、土壤微团粒结构、土壤聚合物、最大分子持水量、土壤生态系统统计熵(即土壤熵情)、土壤矿化能力、土壤酸碱性及电离平衡、土壤气固液三相平衡、微团粒表面吸附与解吸的宏观表达等现象的本质。因此, 土壤生态能值的变化可反映出土壤的综合变化, 作为土壤生态系统健康情况变化的重要判断依据。

要保持土壤的永续利用, 土壤生态系统中能量利用情况是至关重要的。让土壤生态系统保持平衡稳定的因素有: 土壤中能量的输入与输出达到一个动态的平衡。在土壤利用过程中, 保持土壤能量输入和输出的动态平衡, 不仅是土壤肥力持久性的本质特征, 而且是形成较高土地自然生产力的基础。

土壤生态能是土壤生态学中一个综合性变量, 具有广度加和性质, 用 Zh 表示, 相应地建立在土壤热力学性质之上的状态函数[1], 数理基本函数可用式(1)表示:

$$Zh = f(U, T, S, \pi, V, \gamma, A_s, \mu_i, n_i, E_{ad}, n_{\theta}, etc) \quad (1)$$

其热力学定义可用式(2)表示:

$$Zh \equiv U + TS + \pi V + \gamma A_s + \sum \mu_i n_i + E_{ad} n_{\theta} + \dots \quad (2)$$

式中, U 表示土壤体系内能; T 土壤体系的平均温度, S 土壤生态体系统计熵; π 土壤水分渗透压, V 具有渗透性能水分的分体积; γ 为土壤比表面 Gibbs 自由能(或土壤微团粒结构的表面张力), A_s 为土壤体系增减比表面积; μ_i 土壤 i 组分物质的化学势, n_i 为 i 组分的有效交换量; E_{ad} 为土壤吸附能, n_{θ} 为具有吸附覆盖特性的表面吸附量。

土壤生态能值的微分形式用式(3)表示:

$$dZh = dU + TdS + \pi dV + \gamma dA_s + \sum \mu_i dn_i + E_{ad} dn_{\theta} \quad (3)$$

式中所涉及的是土壤体系多种的物理量, 反映的是土壤生态系统能量的微观变化, dZh 值表示每个土壤单位体积单元内微团粒结构的土壤生态能值的变化总和, 其值等于土壤体系与环境所发生的能值交换量。式(3)中各加和项的物理意义分别表示土壤体系内能(dU)、土壤熵值(TdS)、水分渗透压能(πdV)、比表面张力能(γdA_s)、离子化学势($\sum \mu_i dn_i$)、土壤胶体吸附能($E_{ad} dn_{\theta}$)等土壤体系单元的变化量, 它们的加积结果等于土壤生态能值。

在土壤的耕作过程中, dZh 的减少量即为土壤体系对外输出能值的大小, 而增加量则表示土壤体系接受外界环境输入能值的多少。土壤生态能值变化量可以在一定的条件下, 根据其作用范围内通过可逆途径得以恢复, 从而达到土壤生态能值的平衡点。因此, 土壤生态能值表明土壤生态系统健康发展的方向和限度, 进一步可作为土壤调理与改良的判断依据。

土壤生态能值变化量 ΔZh 表明土壤体系所具有的在不同条件下对外界环境所能输出与输入的能值, 其发生的方向可由 ΔZh 进行判断:

- 1) $\Delta Zh < 0$, 土壤体系对外界环境输出能值;
- 2) $\Delta Zh = 0$, 土壤体系与外界环境处于平衡状态;
- 3) $\Delta Zh > 0$, 外界环境向土壤体系输入能值。

可见不同状态下土壤体系的土壤生态能值变化的方向是一种偏离土壤体系平衡状态的极化现象，土壤体系对外输出能值或者由外界环境输入能值，可用于判断土壤体系的土壤生态系统能量转移的重要依据。

3. 土壤生态能的构成

3.1. 土壤内能(U)

内能是热力学的基本物理量之一，也称热力学能，它与焓、Gibbs 自由能、热量、热能、功、能值等都属于能量量纲范畴。由土壤内部状态决定的能量叫做土壤内能，用 U 表示，属于状态函数[9]。显然，在一定条件下，土壤体系所输入或输出的能值部分即外界环境与土壤体系所发生的能值交换反映为土壤体系内能的增减量(ΔU)。由于土壤内能是由土壤内部状态决定的，而土壤是由物质组成的，物质的每一种运动形式都有其相应的能量，因此土壤内能的准确值无法获得。

3.2. 土壤熵值(TS)

土壤熵是土壤生态系统健康状态的一个统计结果，其值采用统计热力学方式进行规定，如式(4)表示：

$$S = k \ln \Omega \quad (4)$$

式中， k 为 Boltzmann 常数，值为 $1.38 \times 10^{-19} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$ ， Ω 表示土壤生态系统健康的统计状态数，微观上反映的是土壤系统的熵情，与土壤微团粒结构相关，具有统计学意义，但 Ω 值难以通过实验和仪器测得。因为 S 为状态函数，可以借助建立土壤体系基准熵值 S_0 ，通过熵的变化量 ΔS 反映出土壤熵值的增减。

3.3. 水分渗透压能(πV)

由于土壤体系溶液中水的化学势与环境水的化学势不同而产生了水分渗透压，水分子可以自由通过两相界面，直至达到化学势平衡的状态。其中，土壤水分渗透压能可简要地用不带电粒子的 von't Hoff 渗透压公式(5)表示：

$$\pi dV = cRT \quad (5)$$

式中 c 为土壤溶液中大分子(主要是土壤有机质)的浓度， R 为普适常数，其值为 $8.314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 。

3.4. 比表面张力能(γA_s)

由于土壤的液相表面具有液体趋于收缩的最基本特性，当扩大单位面积引起的比表面积的增大时，提升了土壤液相的比表面张力能，其中土壤表面张力(γ)的定义如式(6)所示：

$$\left(\frac{\partial U}{\partial A_s}\right)_{T,V,n_B} = \gamma + \left(\frac{\partial S}{\partial A_s}\right)_{T,V,n_B} \quad (6)$$

式中的 T 、 V 、 n_B 分别表示土壤体系的温度、土壤单元体积、土壤中某一物质组分 B 的量都被视为常量。

3.5. 离子化学势($\sum \mu_i n_i$)

土壤体系中各活性离子的偏摩尔 Gibbs 自由能称为离子化学势，所有活性离子的离子化学势可简化为独立存在且具有加和性，其值为土壤体系的离子化学势。土壤中各种离子的化学势，与离子的活度相关，对土壤中离子的吸附、交换、扩散、迁移等过程产生直接的影响。如土壤氮素转化热力学、土壤养分转化以及挥发逸出的水热耦合效应和能量特征等[10] [11] [12]，都是土壤离子化学势变化所表达出来的结果。

3.6. 土壤胶体吸附能($E_{ad}n_0$)

处于土壤微团粒结构固体表面的原子由于周围原子对它的作用力不对称,即土壤体系表面原子所受的力不饱和,因而有剩余力场,可以吸附离子、气体或液体分子,从而产生了土壤胶体吸附能。其中,土壤胶体对离子的吸附是土壤保蓄养分的主要机制[12],其对土壤的健康状况有重要影响。土壤吸附能包括了土壤体系所有离子、气体和液体分子的吸附能。根据土壤体系中离子的吸附能 $\text{NH}_4^+ > \text{K}^+ > \text{Na}^+$,远小于 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的吸附能,可知二价离子的吸附能远大于一价离子的吸附能[4],但二价离子在土壤胶体体系中的浓度却远小于一价离子的浓度。

此外,土壤体系是一个氧化还原体系,一个氧化还原体系的氧化还原电位标志着它与电子或质子的亲和力。土壤体系与外界环境所交换的能值主要取决于 Ca^{2+} 和 K^+ 的相对比例[10] [12],所以离子化学势与土壤胶体微团粒之间存在相关性,为了便于研究与探讨,人为地将离子化学势与土壤胶体吸附能都设定为独立变量。

4. 土壤生态能的影响因素

4.1. 土壤温度的影响

由于土壤的温度受地热和气温变化的影响,土壤的温变总体上呈现夏高冬低的季节变化规律。土壤生态能随温度、含水量和土壤微团粒结构等土壤理化性质变化的影响较大。根据不同温度条件下的土壤生态能,可以使用范特霍夫方程(van't Hoff equation)如式(7)进行分析:

$$\frac{d \ln K}{dT} = \frac{\Delta Zh}{RT^2} \quad (7)$$

其中, K 为土壤生态能 ΔZh 驱动下土壤体系对外输出或接受输入土壤生态能值的极化值。当 $K > 1$ 时,土壤体系可以自发对外输出能值,表现为土壤生态系统良好,其值越大说明越偏离平衡点,对外输出的能值越大,土壤生态系统越发健康;而当 $K < 1$ 时,表示该土壤体系已经无法对外输入能值,表现为障碍土壤,此时需要对土壤进行调理或改良以提高土壤生态能值。因此,可以用 K 值来判断土壤体系系统健康状态的变化限度。由于温度对极化值 K 的影响极大,这也一定程度上解释了为何冬天不宜耕作,而一到夏天就出现百草丰茂的自然现象。

4.2. 土壤中离子活度的影响

离子活度是一个为解决实际体系与理想体系在浓度上的偏差所定义的一个与化学势直接相关的热力学常量。土壤中实际离子浓度与离子活度的乘积定义为土壤离子的活度浓度 C 。对于离子的扩散迁移应用非恒稳状态下扩散过程中浓度随时间变化的 Fick 扩散第二定律如式(8)进行定义:

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} \quad (8)$$

式中, D 为离子迁移扩散系数、 t 为时间、 x 为离子扩散的一维坐标方向。

4.3. 土壤胶体凝聚的影响

土壤中的无机矿物、有机质(腐殖质、有机酸、氨基酸和多糖类生物物质等)构成土壤微团粒胶体结构。由于土壤体系在不同条件下发生不同的变化过程,同时土壤胶体颗粒的凝聚也在自发进行。土壤胶体的凝聚直接影响着土壤体系中胶体颗粒及有机质和无机离子的传输、土壤微团粒结构的形成、土壤中水分的迁移等微观过程,直接导致土壤生态能的降低,从而产生了农田面源污染、水体富营养化、土壤结构恶化等宏观过程。

然而大量的研究表明, 土壤胶体的凝聚受到离子特异性效应的影响, 其广泛存在于土壤胶体的凝聚过程[13], 包括土壤微团粒聚合体的形成和稳定、元素循环、矿物的风化等诸多土壤形成的物理化学过程[14]。其中, 离子交换吸附是土壤与粘土矿物中普遍发生的物理化学过程, 它不仅对土壤与水环境中养分循环以及重金属污染和农田面源污染发生等有直接影响[8] [15], 而且与土壤侵蚀、土壤微团粒聚合体的形成与稳定, 以及土壤水分入渗和土壤化学物质迁移等宏观现象的发生密切相关。

4.4. 离子平衡的影响

土壤中的离子平衡主要包括两个方面, 一个是固液相之间的平衡, 一个是由于不均匀体系中各相的化学势不同而引起的扩散平衡。平衡状态下的土壤体系, 土壤的温度、墒情、渗透压、离子交换量、分子持水量等都处于最佳状态的微团粒聚合体结构的土壤体系内, 任何自发反应总是朝着土壤生态能减小的方向进行, 当 $\Delta Zh = 0$ 时, 土壤体系与外界环境达到能值的平衡。

由于土壤胶体固液相之间的关系比较复杂, 因此采用单纯的土壤溶液中能量关系变化简化相应的研究过程, 并将土壤溶液设置为理想的植物根系的实际理化环境[16]。文献中曾报道对土壤养分的能量和数量关系进行了详细的分析, 指出只有能量水平达到一定标准, 其数量因素才有意义, 从而表明了土壤养分能量对养分有效性的重要作用[17]。同时, 土壤离子活度、离子吸附、交换热力学特征等也是土壤生态体系的主要影响因素[18]。

此外, 对土壤生态能产生影响的因素还有很多, 如土壤氧化还原电位、土壤毛管水上升高度、土壤气相湿度、氧气含量、微团粒孔隙率、土壤墒情、微团粒毛细结构等。土壤生态能值的变化还受土壤中有机物的分解过程以及动植物相应的同化与异化过程的影响。因此, 本研究通过土壤生态体系中所含有的基准物质进行了相关的实验测试后进行数理方法模拟, 依据热力学的相关理论, 建立了土壤生态能热力学状态函数。

5. 障碍土壤的判断

土壤生态能值可以采用能值理论分析法进行表达, 主要能值评价指标为土壤体系与外界环境的输入或输出能值。如果土壤系统能值输入呈下降趋势, 且波动幅度较大, 能值输出呈显著增加趋势, 需对土壤体系进行调理与改良提高土壤生态能值, 从而实现土壤体系的可持续健康发展[19] [20]; 而当土壤生态能值下降至最低点后, 土壤转变为障碍土壤, 必须通过后期长期对土壤结构调理与土壤性能改良, 使土壤生态能值得以恢复上升, 从而实现土壤生态系统健康状态得以平衡发展。

众所周知, 能值实质上是产生某种类别的能量所包含或需要的另一类别能量的数量, 在土壤体系中, 任何物质的形成过程中直接或间接使用的各种能量的总和, 也就是能值的输入与输出。能值分析法从土壤生态系统角度, 将土壤体系生态系统与外界环境相结合, 以能量为基本衡量单位, 当然可以通过能量流图分析不同土壤体系中的能量转化行为的方法。采用土壤生态能值分析法, 可以指导土壤结构的调理与改良, 有利于促进土壤生态系统健康的平衡发展, 并进一步证明土壤结构调理与性能改良关键性技术措施所具有的科学性与合理性。

6. 结论

基于对障碍土壤改良和土壤结构调理的研究, 一个能够表达土壤体系中维持土壤生态系统健康能力的土壤生态能概念由此产生, 涵盖了土壤体系中土壤内能、土壤熵值、水分渗透压能、比表面张力能、离子化学势、土壤胶体吸附能等土壤生态体系理化性质。土壤生态能值(ΔZh)的符号正负表达为土壤生态系统健康发展的方向, 其数值大小表达为土壤生态系统可以对外输出能量多少, 其极化值(K)一定程度上

反应了土壤生态系统的健康程度, 因此土壤生态能值可作为指导障碍土壤改良和土壤结构调理的判据依据, 具有确切的理化依据和明确的可持续发展能力。

基金项目

本项目获得福建师范大学横向课题(DH-1567)资助。

参考文献

- [1] 傅献彩, 沈文霞, 姚天扬, 等. 物理化学(上册) [M]. 第5版. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- [2] 黄昌勇, 徐建明. 土壤学[M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2010: 1-79.
- [3] 王凌云, 莫明浩, 左继超, 张利超, 邓小群. 山水林田湖草生态保护修复背景下水土保持作用机制研究[J]. 中国水土保持, 2020(5): 10-14.
- [4] 于天仁. 土壤化学现象中的能量关系[J]. 土壤学报, 1963, 11(1): 99-108.
- [5] Chen, W., Teng, Y., Li, Z.-G., Liu, W., Ren, W. and Luo, Y. (2018) Mechanisms by Which Organic Fertilizer and Effective Microbes Mitigate Peanut Continuous Cropping Yield Constraints in a Red Soil of South China. *Applied Soil Ecology*, **128**, 23-34. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.03.018>
- [6] Balázs, H.E., Schmid, C.A.O., Podar, D., Hufnagel, G., Radl, V. and Schröder, P. (2020) Development of Microbial Communities in Organochlorine Pesticide Contaminated Soil: A Post-Reclamation Perspective. *Applied Soil Ecology*, **150**, Article ID: 103467. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.103467>
- [7] Constantin, L., Teodorescu, A.C. and Nicolau, M. (2008) Acting Environmentally Proactive in an Emerging Market-Oriented Economy. *Water, Air, Soil Pollution: Focus*, **8**, 565-575. <https://doi.org/10.1007/s11267-008-9174-x>
- [8] 仲乃琴, 刘宁, 赵盼, 蔡冬清, 宋双伟, 钞亚鹏. 中国马铃薯化肥农药减施的现状与挑战[J]. 科学通报, 2018, 63(17): 1693-1702.
- [9] 彭家骥. 关于内能概念的教学研究[J]. 四川师院学报(自然科学版), 1981(1): 42-46.
- [10] 雷涛. 水氮热耦合条件下土壤尿素转化动力学及热力学特性研究[D]: [博士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2018.
- [11] 廖安中, 张淑光, 邓岚, 姚少雄, 谭子文, 余洪生, 等. 上杨试验区水土保持生态系统中土壤微生物的性态与物质能量的转化[J]. 土壤结构改良研究, 1997, 4(3): 102-110.
- [12] 张一平. 土壤养分热力学[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 1-66.
- [13] 田锐. 土壤胶体凝聚中的离子特异性效应[D]: [博士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2014.
- [14] 郁昭轩. 1:1 型电解质引发“细菌-高岭石”混合胶体凝聚的动力学研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2019.
- [15] 杜伟. 极化效应对粘土矿物中离子交换吸附的影响[D]: [博士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2017.
- [16] 仲朝晖. 基于能值理论的土壤结构改良生态效应评价[J]. 水利技术监督, 2018(5): 126-131.
- [17] 朱祖祥. 土壤磷酸盐位的理论与应用[J]. 土壤学报, 1979(2): 190-202.
- [18] 戴波, 周鸿. 生态资产评估理论与方法评价[J]. 经济问题探索, 2004(9): 18-21.
- [19] Altieri, M.A. (2012) Convergence or Divide in the Movement for Sustainable and Just Agriculture. In: Lichtfouse, E., Eds., *Organic Fertilisation, Soil Quality and Human Health*, Springer, Dordrecht, 1-9. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4113-3_1
- [20] Jin, Z., Sun, Y. and Yang, P. (2020) Evaluation of Soil Ecological Benefits of Japonica Rice in Southern Liaoning Based on AHP and Energy Analysis. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **508**, Article ID: 012099. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/508/1/012099>