

文章编号: 1001-411X (2001) 03-0016-04

土壤生态系统耗散结构变异规律研究的理论与方法探讨

简放陵¹, 李华兴²

(1 仲恺农业技术学院环境科学技术研究中心, 广东 广州 510220; 2 华南农业大学资源环境学院, 广东 广州 510642)

摘要: 根据贝塔朗菲系统自生长的微分方程, 可建立表征土壤生态系统动态变化的动力学方程: $dx/dt = (f-s)x - bx^2$, t 为时间, x 为土壤微生物数量, f 为其繁殖系数, s 为死亡系数, b 为饱和系数。其解(1) $x = x_0 e^{(f-s)t}$, (2) $x^* = (f-s)/b$ 。方程(1) 表明, 如 $s > f$, 则当 $t \rightarrow \infty$ 时, $x \rightarrow 0$, 表明土壤生态系统处于热力学分支, 将向退化的方向发展; 方程(2) 表明, 如 $f > s$, 其临界点 $x^* = (f-s)/b$, 如 $x > x^*$, 则表明土壤生态系统处于耗散结构分支, 将向进化的方向演替。

关键词: 土壤生态系统; 耗散结构; 变异规律

中图分类号: S718

文献标识码: A

据统计, 我国 1/3 的耕地面积受到水土流失的危害, 每年流失的土壤达 50 亿 t; 退化草原面积 8 700 万 hm^2 , 15%~20% 的动植物物种受到威胁; 沙化和沙漠化面积占国土面积的 17.6%, 并以 $2400 km^2/a$ 的速度在递增, 使 393 万 hm^2 农田、493 万 hm^2 的草场受到沙漠化的威胁。人类社会发展到跨世纪的今天, 正面临着土壤生态系统退化的巨大挑战^[1,2]。

土壤生态系统是土壤各个子系统在一定的环境条件和人为影响下相互依赖、相互作用的结果。与水体质量、大气质量一样, 在人类社会可持续发展方面具有同等重要的地位, 引起了国内外土壤学、农学、环境科学界的共同关注。近些年来, 国内外对土壤生态系统的变异规律进行了一些研究, 但进展缓慢。究其原因, 固然是因为土壤各个子系统关系太复杂, 但与研究方法不当也不无关系。如土壤养分增加几多, 土壤水分降低几许, 团粒结构增加若干, 土壤温度降低几度, 土壤空气几多变化, 凡此种种, 很难说明土壤生态系统的变异规律。而且, 在土壤生态系统评价指标、评价方法、动态监测和预测预报等方面, 按照传统方法, 也很难有大的突破。目前, 有关土壤生态系统退化与演变的许多理论问题及过程机理尚不清楚, 还没有公认的或统一的土壤生态系统指标和定量化的评价方法, 土壤生态系统动态监测、预测预报等方面进展缓慢, 方法也显得烦琐, 时间间隔太长, 难以及时反映土壤生态系统的动态变化^[2~4]。本文对土壤生态系统耗散结构变异规律和研究方法进行了探讨, 为开展土壤生态系统的动态

监测和预测预报, 进行土壤生态系统分类与评价, 实现其可持续利用提供参考^[5~8]。

1 土壤生态系统耗散结构变异规律的理论探讨

土壤是一个开放的、与外界有物质和能量交换的、远离平衡态的耗散结构。因此, 可采用耗散结构理论研究土壤生态系统的演变规律。在土壤这个开放系统中, 其熵变可表示为:

$$ds = ds_i + ds_o,$$

式中: ds 为土壤生态系统的熵变, ds_i 为土壤生态系统内部的熵变, ds_o 为土壤生态系统外部的熵变 ds_o 。

土壤与外界不断的物质和能量交换中, 如 $ds_i > ds_o$ 时, 则系统的熵变 ds 是增加的, 这代表着土壤生态系统向平衡的热力学方向发展, 即向退化方向发展, 土壤结构解体, 土壤微生物死亡, 土壤沙化, 最终土壤沙漠化; 当土壤与外界的物质和能量交换不断增加, 所形成的负熵流 $ds_o > ds_i$ 时, 则系统的熵变 ds 是减少的, 这代表着土壤生态系统向非平衡的热力学方向发展, 由线形的非平衡热力学方向向非线形的非平衡热力学方向演变, 当到达临界点时, 系统便可自我复制、自我放大, 使土壤生态系统形成新的耗散结构, 或从低级的耗散结构向高级的耗散结构方向演替^[9], 结果见图 1。

由上可知, 土壤生态系统耗散结构理论的研究应包括负熵流 ds_o 和临界点 2 个方面。目前, 主要集

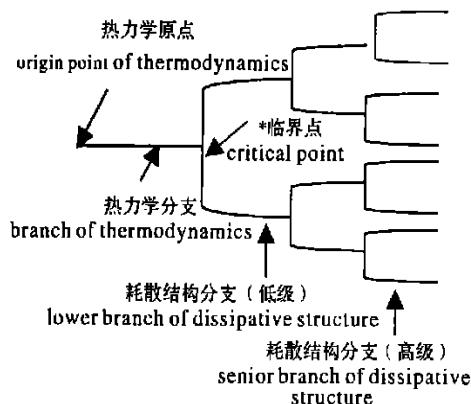


图1 土壤生态系统耗散结构进化途径

Fig. 1 Evolutionary path of soil ecosystem dissipative structure

中在负熵流 d_{S_0} 方面, 有不少学者根据土壤有机质、N、P 等计算负熵流 d_{S_0} , 并根据熵变 ds 的大小, 进行土壤肥力的分类以及施肥^[10]。但负熵流 d_{S_0} 究竟要多大, 才能大于 ds_i , 使土壤生态系统的熵变 ds 为负, 使之由热力学分支向耗散结构分支进化, 或由低级的耗散结构分支向高级的耗散结构分支演替? 这个问题的研究至今还没有进展; 另一个问题土壤生态系统的状态变量究竟要演替到何种程度才能达到临界点, 使之由热力学分支向耗散结构分支进化, 或由低级的耗散结构分支向高级的耗散结构分支演替? 然而, 这方面的研究较少。

采用耗散结构理论研究土壤生态系统的变异规律, 其关键是建立土壤生态系统动态变化的动力学方程, 并求出其临界值。假设土壤生态系统的动态变化可用一联立微分方程组来描述:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= f(A, x_1, x_2, \dots, x_n), \\ \frac{dx_2}{dt} &= f(A, x_1, x_2, \dots, x_n), \\ &\vdots \\ \frac{dx_n}{dt} &= f(A, x_1, x_2, \dots, x_n), \end{aligned}$$

式中: $\frac{dx_i}{dt}$ 表示土壤生态系统某一因子的动力学变化; x_1, x_2, \dots, x_n 是说明土壤生态系统状态变化的量, 代表土壤生态系统的内在结构与外在状态, 可以发生变化的量, 它可用来说明土壤生态系统的有序程度, 因此, 也叫序参量。在无序的热力学分支上, 它们都为零; A 为控制参量, 在土壤生态系统的演化过程中, 它不发生变化, 但改变它, 可改变整个演化过程, 并决定性的影响序参量 x_i 的最终演化结果, 即 x_i 要么处于热力学分支, 要么处于耗散结构分支。如方程出现了非零的稳定解, 则表明土壤生态系统处于稳定的耗散结构分支上。

从图 2 可以看出土壤生态系统的因子之多、关系之复杂, 要建立土壤生态系统的微分方程组, 是相

当艰巨的, 当今土壤科学很难担此大任。如用单个的土壤生态系统因子, 如土壤养分、土壤水分、土壤有机质、土壤矿物质、土壤结构、土壤空气、土壤温度、土壤植被等来描述土壤生态系统的状态, 则遇到的问题是不仅它们有的微分方程还一时难于建立, 更重要的是它们仅表现了土壤生态系统的某些方面而不是实质, 而且, 即便建立了这样的微分方程组, 也难解; 解了, 也由于参数之多难于应用。土壤生态系统耗散结构的研究陷入困境, 停滞不前。目前, 土壤生态系统耗散结构的研究基本上还处于超熵判据的定性阶段。那么, 能不能找一个既能建立它的微分方程, 又能反应土壤生态系统实质的因子来代替呢? 这个问题值得探索。

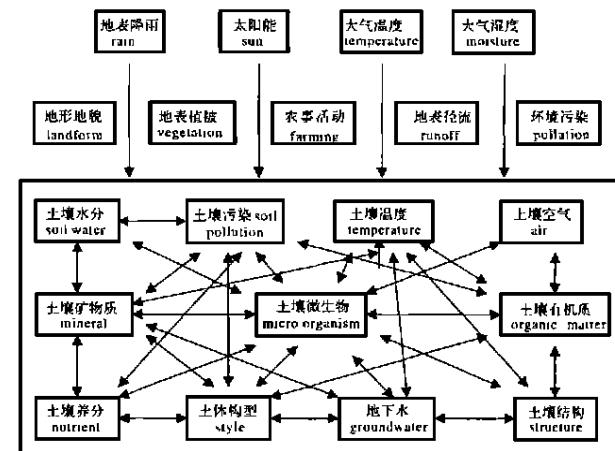


图2 土壤生态系统网络图

Fig. 2 Network of soil ecosystem

2 土壤生态系统耗散结构变异规律的研究方法探讨

土壤生态系统的实质是土壤肥力。土壤肥力越低, 土壤生态系统就处于较低的耗散结构分支, 土壤肥力越高, 土壤生态系统就处于较高的耗散结构分支。根据大量的生产实践经验和研究资料, 我们不难看出, 大凡生物活性低的土壤, 土壤肥力也越低, 生物活性高的土壤, 土壤肥力也越高。这不仅生物因子是土壤肥力的因子之一, 更在于土壤生物活性能反映土壤的土壤养分、土壤水分、土壤有机质、土壤矿物质、土壤结构、土壤空气、土壤温度、土壤植被、土壤污染等等内在因素以及外在因子如大气、温度、湿度、日照、降雨、干旱、农事活动等等的综合作用。可以说, 凡是影响土壤肥力的因子, 无一例外地影响土壤生物活性, 它们之间有极好的相关性。因此, 可用生物活性来表征土壤肥力。从图 3 可以看出这一点。

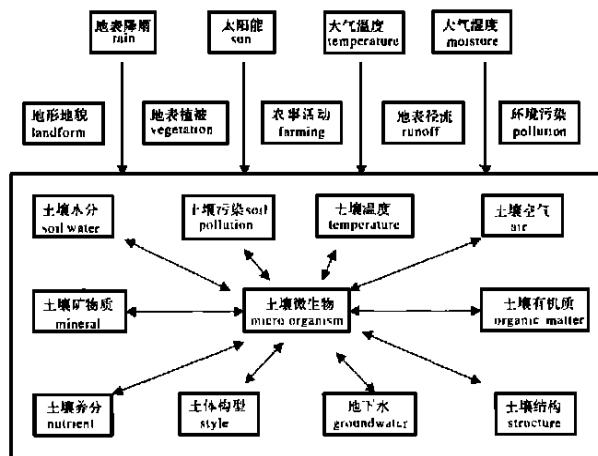


图3 土壤微生物与土壤生态系统各个子系统和环境因子之间的关系

Fig 3 Relation between soil microorganism and subsystems of soil ecosystem and factors of environment

根据贝塔朗菲系统自生长的微分方程^[10], 土壤生物活性动态变化的动力学方程如下:

$$dx/dt = (f - s)x - bx^2,$$

式中: x 为土壤微生物数量, t 为时间, f 为土壤微生物的繁殖系数, s 为土壤微生物的死亡系数, b 为土壤微生物的饱和系数.

解方程, 若 $s > f$, $x = x_0 e^{(f-s)t}$, 要么处于耗散结构分支. 如方程出现了非零的稳定解, 则表明土壤生态系统处于稳定的耗散结构分支上.

当 $t \rightarrow \infty$ 时, $x \rightarrow 0$, 即土壤水分不足, 养分有限, 结构不良, 温度不适宜, 空气不畅通, 土壤被污染, 环境条件恶化等等, 使土壤微生物的死亡系数大于土壤微生物的繁殖系数, 那么, 当时间趋近于无穷大时, 土壤生态系统的微生物活性将趋近于零, 土壤肥力将丧失, 土壤生态系统将向退化的方向发展, 现有的有序也将变为无序. 土壤的沙化, 沙漠化就代表这一类型, 此时, 整个土壤生态系统处于无序状态.

如果土壤水分充足, 养分丰富, 结构良好, 温度适宜, 空气畅通, 土壤没被污染, 环境条件改善等等, 使土壤微生物的繁殖系数大于土壤微生物的死亡系数, 即 $f > s$, 那么, 解方程, 得下面的2个解:

$$x = 0,$$

$$x^* = (f - s)/b.$$

根据稳定性分析^[5], $x = 0$ 的这个定态解就不再稳定了, 它使土壤生态系统处于不稳定的热力学分支上; 而 $x^* = (f - s)/b$ 这个新出现的定态解则是稳定的, 它表示当土壤生物活性等于土壤微生物的繁殖系数减去土壤微生物的死亡系数, 并与土壤微生物的饱和系数相除时, 就可使土壤生态系统处于

稳定的耗散结构分支上, 并可使土壤生态系统从无序变为有序, 或从低级的耗散结构向高级的耗散结构方向发展、演替, 使土壤生态系统向高级的、良性的、复杂的方向进化, 形成自组织化更高的耗散结构系统.

定态解 $x^* = (f - s)/b$ 中的3个参数与土壤生态系统密切相关, 它们是土壤生态系统诸因子与环境诸因子共同作用的结果, 它们的物理意义明确, 并可借助现代生物学方法准确测定. 这对研究土壤生态系统的演变规律, 建立土壤生态系统评价指标和分类体系, 评价土壤生态系统, 进行土壤生态系统分类, 开展土壤生态系统的动态监测, 预测土壤生态系统的进化与退化, 并利用土壤生态系统变异规律和动态监测结果培肥土壤, 强化土壤生态系统的科学管理, 实现可持续利用等有着极为重要的意义.

该方法的特色与创新之处在于: 避开了土壤生态系统各个子系统之间纷繁复杂的次要矛盾, 抓住了土壤生态系统的主要矛盾, 即用与土壤生态系统各个子系统之间均有相互作用、而与环境各个因子之间关系又极为密切的土壤生物活性来表征土壤生态系统的动态变化, 并建立了土壤生物活性的非线性动力学方程. 根据测定土壤生物的繁殖系数 f 、死亡系数 s 和饱和系数 b , 便可求出其临界值的定态解, 并与测定的土壤生物总数比较, 以此判断其是处于热力学分支, 还是处于耗散结构分支; 是由低级的耗散结构分支向高级耗散结构分支演替, 还是由高级的耗散结构分支向低级的耗散结构分支退化, 使土壤生态系统变异规律、土壤生态系统评价指标、土壤生态系统分类体系、土壤生态系统动态监测和预测预报以及可持续利用等核心问题迎刃而解.

3 结论

本文根据贝塔朗菲系统自生长的微分方程, 建立了表征土壤生态系统动态变化的动力学方程:

$$dx/dt = (f - s)x - bx^2, \text{ 其解为: (1) } x = x_0 e^{(f-s)t}, \text{ (2) } x^* = (f - s)/b.$$

方程(1)表明, 如 $s > f$, 则当 $t \rightarrow \infty$ 时, $x \rightarrow 0$, 土壤生态系统将向退化的方向发展;

方程(2)表明, 如 $f > s$, 其临界点 $x^* = (f - s)/b$, 如 $x > x^*$, 则土壤生态系统将向进化的方向演替.

定态解 $x^* = (f - s)/b$ 中的3个参数在一定的土壤和环境条件下是一定值, 其物理意义明确, 并可利用现代微生物学进行准确测定. 这对研究土壤生态系统的演变规律, 建立土壤生态系统评价指标和分类体系, 评价土壤生态系统, 进行土壤生态系统分

类, 开展土壤生态系统的动态监测, 预测土壤生态系统的进化与退化, 并利用其变异规律和动态监测结果培肥土壤, 强化土壤生态系统的科学管理, 防治土壤退化, 实现可持续利用等有着极为重要的意义。

参考文献:

- [1] 刘慧. 我国土地退化与特点及防治对策[J]. 自然资源, 1995, (4): 1—7.
- [2] 张桃林, 潘剑君, 赵其国. 土壤生态系统研究进展与方向[J]. 土壤, 1999, (1): 1—7.
- [3] DORAN J W, JONES A J. Methods for assessing soil ecosystem quality [J]. SSS Special Publication, 1996, 47: 25—38.
- [4] DORAN J W, COLWMAN D C, BEZDICEK D F, et al. Defining soil ecosystem quality for a sustainable environment [J]. SSA Special Publication, 1994, 35: 34—46.
- [5] 杨郁挺, 刘平. 石节子沟小流域综合治理耗散结构分析[J]. 中国水土保持, 1996 (12): 19—20.
- [6] 徐明岗. 用土壤系统熵评价陕西省土壤肥力[J]. 土壤肥料, 1994, (1): 13—15.
- [7] 林文雄, 吴志强. 用耗散结构理论分析福建农田土壤生态系统[J]. 福建农学院学报, 1991, 20(2): 230—234.
- [8] 朱孔来. 论熵、耗散结构理论在生态农业研究与建设中的应用[J]. 生态经济, 1991, (4): 22—25.
- [9] HAKEN H. Synergetics [M]. Teubner: Stuttgart, 1973: 42—46.
- [10] 贝塔郎菲. 一般系统论——基础、发展和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1987. 90

Theoretical and Methodological Discussion on the Research of Dissipative Structure of Soil Ecosystem

JIAN Fang-ling, LI Hua-xing

(1 Zhongkai Environmental Science and Technology Research Center, Guangzhou 510225, China)

2 College of Resources & Environmental Sciences South China Agric. Univ., Guangzhou 510642, China)

Abstract: According to the equation of the system self-growing, the nonlinear differential equation that can indicate the soil ecosystem dynamic change is suggested: $dx/dt = (f - s)x - bx^2$, where, x —biological activity in soil ecosystem, t —time, f —coefficient of biological propagation, s —coefficient of biological death, b —coefficient of biological saturation. The solution of the equation is follow as: (1) $x = x_0 e^{(f-s)t}$, (2) $x^* = (f-s)/b$. The equation (1) shows if s is larger than f , when time tends to ∞ , x will tend to zero, and soil ecosystem locates at the branch of thermodynamics, and it will develop in the direction of degeneration. The equation (2) shows if f is larger than s , critical point $x^* = (f-s)/b$. When x is larger than x^* , the soil ecosystem locates at the branch of dissipative structure, and it will develop the direction of evolution.

Key words: soil ecosystem; dissipative structure; change law

【责任编辑 周志红】