

EPIC 模型中土壤氮磷运转和作物营养的数学模拟

李军¹, 邵明安^{1,2}, 张兴昌¹

(1 中国科学院水利部水土保持研究所、西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨陵 712100;

2 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 土壤侵蚀和生产力影响估算模型 EPIC 是国际上较有影响的水土资源管理和作物生产力评价动力学模型。本文简要介绍了 EPIC 模型中描述土壤氮磷养分运转与作物氮磷营养的基本原理及其主要数学方程。在作物和土壤微生物等生物因素, 热量、降水等气候因素, 施肥、灌溉和土壤耕作等管理因素的影响下, 农田土壤氮素和磷素不断发生空间运移和形态转化。EPIC 模型能够逐日定量描述土壤中氮磷养分的矿化与固定、硝化与反硝化、淋洗与挥发、流失与吸收、矿质磷循环、豆科作物固氮等运移、转化及作物吸收过程的变化速率和数量, 揭示出土壤剖面氮磷运移、转化和作物营养的动态变化规律, 可供农田土壤管理和作物营养定量评价研究中借鉴。

关键词: EPIC 模型; 氮; 磷; 运转; 模拟

中图分类号: S11

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2005)02-0166-08

Simulation equations for soil nitrogen and phosphorus transfer and crop nutrition in the EPIC model

LI Jun¹, SHAO Ming an^{1,2}, ZHANG Xing chang¹

(1 State Key Lab of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Inst. of Soil and Water Conservation, CAS and MOWR,

Northwest Sci. Tech. Univ. of Agric. and For., Shaanxi, Yangling 712100, China;

2 Inst. of Geographic Sci. and Natural Resour. Res., CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator, now it is renamed as Environmental Policy Integrated Climate Model) is a world famous comprehensive dynamic model developed by US. The major components in EPIC are weather simulation, hydrology, erosion sedimentation, nutrient cycling, pesticide fate, plant growth, soil temperature, tillage, economics, and plant environment control. It can be used to assess the effect of management strategies on field soil and water resources and crop productivity. Because the systematical and functional simulation model related to processes of soil nitrogen and phosphorus transfer and transform and crop nutrition has not been developed in China yet, the principles and mathematical equations used for simulating soil nitrogen and phosphorus transfer and crop nutrition in the EPIC model were briefly introduced in this paper. The nutrient cycling process is affected by biological factors, such as crop and soil microbe, and weather factors, such as temperature and rainfall, and also soil management factors, such as fertilization, irrigation and soil tillage, hence, soil nitrogen and phosphorus spatially migrate in the soil profile and transform into different forms ceaselessly. More than 80 mathematical equations are used in the EPIC model to describe the detail dynamic processes of soil nitrogen and phosphorus mineralization and immobilization, nitrate and soluble P loss in surface runoff, organic N and P transported by sediment in soil erosion, nitrification, detritification, NO_3^- -N leaching and transported by soil water evaporation, ammonia volatilization, mineral P cycling among labile, active mineral, and stable mineral pool, and crop N and P demands and soil supplies, nitrogen fixation of legume etc. The flow rates and amounts of soil

收稿日期: 2004-03-10 修改稿收到日期: 2004-06-01

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G2000018605); 国家杰出青年科学基金资助项目(40025106); 国家自然科学基金项目(40371077, 30471024); 陕西省自然科学研究计划项目(2001SM13)

作者简介: 李军(1964—), 男, 甘肃涇川人, 博士, 副教授, 主要从事旱区农业资源开发与区域发展、作物生产系统模拟与决策等方面的科研与教学工作。

nitrogen and phosphorus migration and transformation and crop nutrition are simulated continuously with a daily time step for one to hundred years, and the simulated results can be outputted with daily, weekly, decade, monthly or annually interval. It can be used to analyze the dynamic principle of soil nitrogen and phosphorus transfer and transform in soil profile and crop nutrition in crop production. This paper can be used as reference for field soil management and crop nutrition quantitative assessment research.

Key words: EPIC model; nitrogen; phosphorus; transfer; simulation

在作物生产过程中, 农田土壤氮磷循环与平衡、作物营养状况及其调控是土壤培肥、作物营养等学科方向关注的焦点问题之一。由于土壤生态系统的复杂性, 国内有关土壤氮磷运移、转化和作物吸收过程研究多以定性描述为主, 少量定量研究也只是针对氮磷运转的某一个环节, 尚未建立系统性和机理性的农田土壤氮磷运转和作物营养定量评价模型^[1-8]。美国等发达国家在对农田土壤氮磷运移、转化和作物吸收过程定量研究基础上, 组建了系统性和机理性较强的描述土壤氮磷运转和作物营养的系统动力学模型, 并将其整合到作物生产系统模拟模型之中, 作为作物生产过程中定量和动态评价土壤氮磷循环与平衡状况、作物营养状况及其调控策略的工具^[9-17]。本文以 EPIC 模型为例, 简要介绍该模型中描述土壤氮、磷养分运转和作物氮磷营养的系统动力学模型原理及其主要数学方程, 供我国农田土壤养分运转和利用定量评价研究中借鉴。

1 氮磷运转与作物营养模拟的基本原理

作物生产系统模拟模型是指能定量地和动态地描述作物生长、发育和产量形成过程及其对气候、土壤等环境因素响应的计算机模拟程序, 简称为作物模拟模型(Crop Simulation Model)或作物模型(Crop Model)。它是对真实复杂作物生产系统的简化表达形式, 是在全面收集和深刻理解作物生理、生态、气象、土壤和农学等学科的详细试验数据和研究成果基础上, 采用系统分析的方法对作物生产系统的试验结果加以理论概括与数据量化, 建立“气候—土壤—作物—管理”综合系统要素间定量关系的动力学模型; 应用数值计算方法与计算机模拟技术, 实现定量描述和动态表达作物生产系统的运行状态和结果。它以系统性、动态性、机制性、预测性和通用性, 有助于人们理解、预测和调控作物生产过程及其生产环境, 实现作物持续高产、稳产和高效的目标^[9-11]。

土壤侵蚀和生产力影响的估算模型 EPIC (Eros-

sion Productivity Impact Calculator), 现又称为环境政策综合气候模型(Environmental Policy-Integrated Climate Model)^[11]是美国研制的定量评价“气候—土壤—作物—管理”综合连续系统的动力学模型。能够以日为时间步长模拟一季至上百年的农田水土资源和作物生产力的动态变化, 可用来定量评价农田作物生产力和水土资源管理策略的效果^[11-14]。EPIC 模型作为一种多作物通用型作物生产系统模拟模型, 在世界范围内得到了广泛的试验验证与研究应用, 成为较有影响的水土资源管理和作物生产力评价模型之一^[16-17]。

EPIC 模型由气象模拟、水文学、侵蚀泥沙、营养循环、农药残留、作物生长、土壤温度、土壤耕作、经济效益和作物环境控制等模块组成, 包含了 350 多个数学方程。其中, 直接描述土壤氮磷运转和作物养分吸收过程的数学方程有 80 多个。EPIC 模型对土壤剖面氮磷运移、转化和作物营养过程的定量描述较为细致, 模型运行所需要的土壤剖面理化性状参数包括: 土壤剖面各土层的厚度、容重(33 kPa)、凋萎湿度、田间持水量、沙粒含量、粉沙粒含量、有机氮浓度、pH 值、离子总量、有机碳含量、CaCO₃ 含量、阳离子代换量、粗砾含量、硝态氮浓度、速效磷浓度、作物残茬量、容重(烘干重)、磷素吸附率、饱和导水率、地下水水平流运转时间、有机磷浓度等 20 多项; 将土壤剖面分为 10 个土层, 逐层描述土壤温度、水分、空气状况, 进而定量描述土壤中不同形态氮磷养分的运移、转化及作物吸收的速率和数量。在逐日太阳辐射量、最高气温、最低气温和降水量等气象要素驱动下运行, EPIC 模型逐日进行作物基本生理生态过程、土壤水肥循环与平衡状况的描述与计算, 并能够输出逐日、逐周、逐旬、逐月或逐年等不同时间尺度的作物生产系统状态变量值, 从而揭示出土壤剖面氮磷运移、转化和作物营养的动态变化规律, 可作为农田土壤氮磷养分管理评价的科学依据^[12-14]。

在应用 EPIC 模型进行农田养分循环与平衡的动态模拟研究时, 为了便于科学和合理修订 EPIC 模型有关参数, 有必要了解 EPIC 模型中对土壤氮磷运

移、转化和作物营养模拟的有关数学方程。同时,该模型中有关土壤氮磷循环与平衡、作物营养与及调控的定量模拟原理,也可供国内土壤氮磷运转和作物营养定量评价模型研究中借鉴。

2 土壤氮素运转的数学模拟^[10-13, 18-30]

农田土壤氮素受作物和土壤微生物等生物因素、热量和降水等气候因素、施肥、灌溉和土壤耕作等管理因素的影响,不断发生空间运移和形态转化,包括矿化与固定、硝化与反硝化、淋洗与挥发、流失与吸收等动态变化过程,EPIC 模型对上述有关过程分别进行了定量模拟(图 1)。

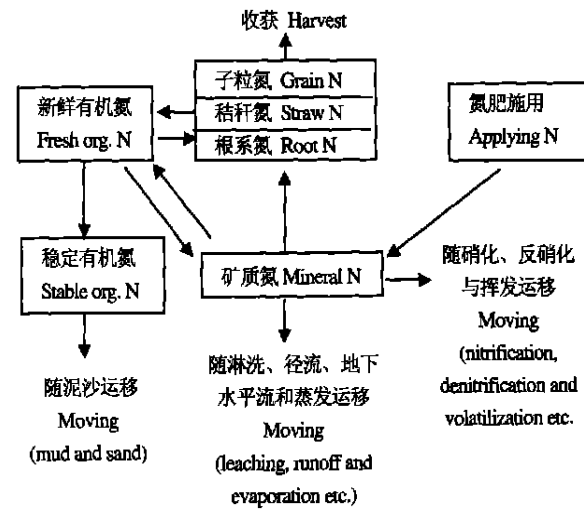


图1 EPIC 模型中营养子模型的氮素库与流
Fig.1 Nitrogen pool and flows in the nutrient submodel of EPIC

2.1 氮素随淋洗、地表径流和地下水平流的流失^[18]

当水流通过土层时,采用 NO_3^- -N 浓度变化来估计 NO_3^- -N 的流失量:

$$WNO3 = WNO3 \left\{ 1 - \exp \left[\frac{-QT}{(b1)(PO)} \right] \right\} \quad (1)$$

(1) 式中, $WNO3$ 是某一土层中流失的 NO_3^- -N 量, $WNO3$ 是土层中含有的 NO_3^- -N 含量, QT 是浸透该土层的水分体积, $b1$ 是贮水空隙被浸透水占据的比例, PO 是土壤空隙度。

QT 浸透过程中 NO_3^- -N 平均浓度为:

$$CNO3 = \frac{WNO3}{QT} \quad (2)$$

(2) 式中, $CNO3$ 是在体积为 QT 的水分浸透某一土层时土层中 NO_3^- -N 平均浓度。地表径流、地下水平

流和渗透水流中含有的 NO_3^- -N 数量可用水的体积与方程(2)计算的浓度相乘来计算。

2.2 随土壤水分蒸发的 NO_3^- -N 运移

当水分从土壤中蒸发时, NO_3^- -N 通过溶质流向上运动到表土层,其估计方程为:

$$ENO3 = \sum_{l=2}^M SEV_l^* (CNO3)_l \quad (3)$$

(3) 式中, $ENO3$ 是随土壤水分蒸发从下层运转到上层的 NO_3^- -N 数量(kg/hm^2), SEV^* 是经土壤含水量校正后的土壤水分蒸发量(mm), $CNO3$ 是土层中 NO_3^- -N 平均浓度,下标 l 表示土层, M 是参与土壤水分蒸发(最大深度 0.2m)的土层数。

2.3 泥沙中有机 N 的运移^[18]

估计某一径流过程中有机 N 损失的运移函数为:

$$YON = 0.001(Y)(CON)(ER) \quad (4)$$

(4) 式中, YON 是有机 N 径流损失量(kg/hm^2), Y 是泥沙产量(t/hm^2), CON 是表土层有机 N 浓度(g/t), ER 是富集速率。富集速率是泥沙中有机 N 浓度与土壤中有有机 N 浓度的比值,估算富集速率的对数方程为:

$$ER = X_1 CS^{X_2} \quad (5)$$

(5) 式中, CS 是泥沙浓度(g/m^3), X_1 和 X_2 分别为估计富集速率的上、下限参数,采用下式估计:

$$X_2 = -\log\left(\frac{1}{DR}\right) / 2.699 \quad (6)$$

$$X_1 = \frac{1}{(0.1)^{X_2}} \quad (7)$$

(6) 中, DR 是泥沙传输速率(泥沙产量与总面蚀量之比),采用下式估计:

$$DR = \left(\frac{q_p}{r_\varphi} \right)^{0.5} \quad (8)$$

(8) 式中, q_p 是峰值径流速率(mm/h), r_φ 是峰值降水超额速率(mm/h),可用下列方程估计:

$$r_\varphi = r_p \left(\frac{Q}{R} \right)^{0.1} \quad (9)$$

(9) 式中, r_p 是峰值降水速率(mm/h), Q 是径流量, R 是降水量。

2.4 反硝化作用

作为一个微生物学过程,反硝化是温度和水分含量的函数。计算反硝化速率的方程为:

$$DN_l = WNO3 \left\{ 1 - \exp \left[(-1.4)(TF_{NI})(C_l) \right] \right\}, \quad SWF \geq 0.95 \quad (10)$$

$$DN = 0, \quad SWF < 0.95$$

(10) 式中, DN 是某一土层反硝化速率

[$\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$], TF_N 是物质循环温度因子, C 是有机碳含量(%), SWF 是土壤水分因子。温度因子 TF_N 采用下式估计:

$$TF_{Nl} = \max \begin{cases} 0.1 \\ \frac{T_l}{T_l + \exp(9.93 - 0.312T_l)} \end{cases} \quad (11)$$

(11) 式中, \max 表示取二者最大值, T 是土壤温度($^{\circ}\text{C}$), 下标 l 表示土层。土壤水分因子 SWF 采用下式计算:

$$SWF_l = \frac{SW_l}{FC_l} \quad (12)$$

(12) 式中, SW 是某一土层土壤含水量(mm), FC 是田间持水量(mm)。

2.5 N 的矿化

N 矿化模型考虑了 2 种来源 N 的矿化: 由作物残茬和微生物生物量组成的新鲜有机 N 库; 由土壤腐殖质组成的稳定有机 N 库^[19-20]。新鲜有机 N 的矿化可用下列方程描述:

$$RMN_l = (DCR_l)(FON_l) \quad (13)$$

(13) 式中, RMN 是土层中新鲜有机 N 的 N 矿化速率 [$\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$], DCR 是新鲜有机 N 的分解速率常数, FON 是土层新鲜有机 N 数量 (kg/hm^2)。分解速率常数 DCR 是 C/N 比、C/P 比、作物残茬组成、温度和土壤水分的函数^[21]:

$$DCR_l = 0.05(CNP_l) \sqrt{\frac{SW_l}{FC_l}} * TF_{Nl} \quad (14)$$

(14) 式中, CNP 是 C/N 和 C/P 比因子, FC 是田间持水量时的土壤含水量(mm), TF_N 是物质循环温度因子。 CNP 的值采用下式计算:

$$CNP_l = \min \begin{cases} \exp[-0.693(CNR_l - 25)/25] \\ \exp[-0.693(CPR_l - 200)/200] \\ 1.0 \end{cases} \quad (15)$$

(15) 式中, \min 表示取三者最小值, CNR 是土层中作物残茬的 C/N 比, CPR 是土层中作物残茬的 C/P 比, 分别采用下式计算:

$$CNR_l = \frac{0.58FR_l}{FON_l + WNO3_l} \quad (16)$$

$$CPR_l = \frac{0.58FR_l}{FOP_l + AP_l} \quad (17)$$

(16) 和 (17) 式中, FR 是土层中作物残茬数量 (kg/hm^2), FON 是有机 N 数量 (kg/hm^2), $WNO3$ 是土层中含有的 NO_3^- -N 数量 (kg/hm^2), FOP 是有机 P 数量 (kg/hm^2), AP 是土层中速效 P 数量 (kg/hm^2)。

与腐殖质结合的有机 N 采用下式可分为 2 个库: 活化库和稳定库

$$ON_{al} = (RTN_l)(ON_l) \quad (18)$$

(18) 式中, ON_a 是活化的或有待矿化的库含量 (kg/hm^2), RTN 是活化库比例, ON 是总有机 N 含量 (kg/hm^2), 下标 l 代表土层数目。耕层中活化库比例取决于土壤耕作的年数^[19], 用下式确定:

$$RTN_l = 0.4 \exp(-0.0277 YC) + 0.1 \quad (19)$$

(19) 式中, YC 是模拟开始前耕作的年数。耕层之下的活化库比例被设为耕层值的 40%。

只有活化库的有机 N 才能矿化, 腐殖质矿化方程为:

$$HMN_l = (CMN)(ON_{al})(SWF_l * TF_{Nl})^{0.5} (BD_l)^2 / (BDP_l)^2 \quad (20)$$

(20) 式中, HMN 是土层 l 活化有机 N 库矿化速率 [$\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$], CMN 是腐殖质矿化速率常数 ($0.0003/\text{d}$), SWF 是氮素运转的土壤水分因子, TF_N 是物质循环温度因子, BD 是土壤固定容重 (t/m^3), BDP 是受土壤耕作影响的当前容重 (t/m^3)。

2.6 N 的固定

逐日 N 固定量采用从微生物同化量中减去作物残茬中 N 数量来计算:

$$WIM_l = (DCR_l)(FR_l)(0.016 - CNFR) \quad (21)$$

(21) 式中, WIM 是土层中 N 的固定速率 [$\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$], DCR 是新鲜有机 N 的分解速率常数, FR 是土层中作物残茬数量 (kg/hm^2), $CNFR$ 是作物残茬中 N 的浓度 (g/g)。N 固定受 N 或 P 的有效性制约, 采用下式调整分解速率常数:

$$DCR'_l = \frac{0.95 WNO3_l}{FR_l(0.016 - CNFR)} \quad (22)$$

(22) 式中, DCR'_l 允许利用土层中有效 NO_3^- -N 的 95%。

2.7 硝化作用

氨态 N 向硝态 N 的转化为硝化作用, 采用下列方程来计算硝化作用:

$$RNV_l = WNH3_l [1 - \exp(-AKN_l - AKV_l)] \quad (23)$$

(23) 式中, RNV 是氮素硝化和挥发的综合速率 [$\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$], $WNH3$ 是 NH_3 的重量 (kg/hm^2), AKN 是硝化调节因子, AKV 是土层挥发调节因子。硝化调节因子 AKN 是温度、土壤含水量、土壤 pH 值的函数, 可以表示为:

$$AKN_l = (TF_l)(SWF_l)(PHF_l) \quad (24)$$

(24) 式中温度因子 TF 采用下式估计:

$$TF_l = 0.41(T_l - 5.0)/10, T > 5 \quad (25)$$

(25) 式中, T 是土层温度 ($^{\circ}\text{C}$); (24) 式中土壤水分因子 SWF 用下式计算^[9, 12]:

$$SWF_l = \frac{SW_l - WP_l}{SW_{25l} - WP_l}; SW_l < SW_{25l} \quad (26)$$

$$SWF_l = 1, SW_{25l} < SW < FC_l \quad (27)$$

$$SWF_l = 1 - \frac{SW_l - WP_l}{SW_{25l} - WP_l}, SW_l > FC_l \quad (28)$$

(26)、(27)和(28)式中, SW 是土层土壤水分含量(mm), WP 是土层凋萎点土壤水分含量(mm), FC 是土层土壤田间持水量(mm), SW_{25} 是土层 $WP + 0.25(FC - WP)$ 时土壤含水量(mm)。

(24)式中土壤 pH 因子 PHF 采用下列方程计算:

$$PHF_l = 0.307PH_l - 1.269, PH_l < 7 \quad (29)$$

$$PHF_l = 1, 7 < PH_l < 7.4 \quad (30)$$

$$PHF_l = 5.367 - 0.599PH_l, PH_l > 7.4 \quad (31)$$

(29)、(30)和(31)式中, PH 是土层土壤 pH 值。

2.8 N 的挥发

N 的挥发是氨气挥发到大气中的损失。地表施用氨气的挥发采用温度和风速的函数估计:

$$AKV_l = (TF_l)(WNF) \quad (32)$$

(32)式中, AKV 是方程(23)中挥发调节因子, WNF 是表层(第一层)施肥时风速因子。

$$WNF = 0.335 + 0.161 \ln(V_l) \quad (33)$$

(33)式中, V 是第 i 天的平均风速(m/s)。

表层下的挥发采用氨气在土壤中分布的深度、土壤阳离子交换量和土壤温度来估计:

$$AKV_l = (TF_l)(CECF_l)(DPF_l), l > 1 \quad (34)$$

(34)式中, 阳离子交换量因子 $CECF$ 采用下列方程估计:

$$CECF_l = 1 - 0.038CEC_l \quad (35)$$

$$CECF_l \geq 0$$

(35)式中, CEC 是土层阳离子交换量。(34)式中深度因子 DPF 采用下式计算:

$$DPF_l = 1 - \frac{ZZ}{ZZ + \exp(4.706 - 0.0305ZZ)} \quad (36)$$

(36)式中, ZZ 是土层 l 中部的深度(mm)。

3 土壤磷素运转的数学模拟^[10,13,31-37]

与土壤氮素一样, 土壤磷素的运移和转化过程受生物、气候和管理等因素的影响(图 2)。

3.1 地表径流中的可溶性 P 的损失

由于 P 素流失绝大部分与泥沙相联系, 可溶性 P 随径流损失的方程为:

$$YSP = 0.01(CLP_l)(Q)k_d \quad (37)$$

(37)式中, YSP 是在径流量 Q (mm) 中损失的可溶性 P(kg/hm²), CLP 是土层 l 中速效 P 的浓度(g/t), k_d

是泥沙中 P 浓度与泥沙中水分之比(m³/t)。在 EPIC 中, k_d 取值 175。

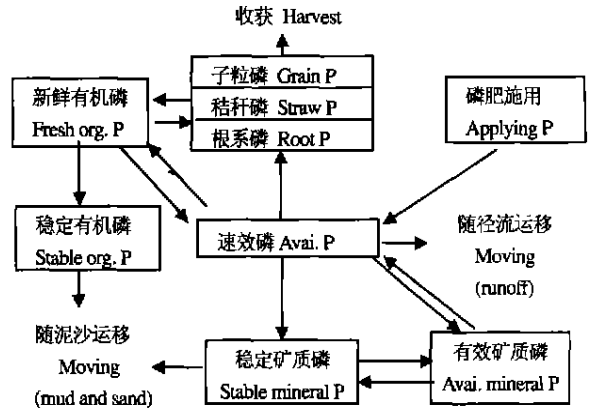


图 2 EPIC 模型中营养子模型的磷素库与流
Fig. 2 Phosphorus pool and flows in the nutrient submodel of EPIC

3.2 泥沙中 P 的运移

P 的沉积态运移函数为:

$$YP = 0.001(Y)(C_p)(ER) \quad (38)$$

(38)式中, YP 是径流中沉积态 P 的损失量(kg/hm²), C_p 是顶层土壤中 P 的浓度(g/t), ER 是 P 的富集速率。

3.3 P 的矿化

每一土层新鲜有机 P 库的矿化采用下式估计:

$$RMP_l = (DCR_l)(FOP_l) \quad (39)$$

(39)式中, RMP 是土层 l 中新鲜有机 P 矿化速率[kg/(hm²·d)], FOP 是作物残茬中新鲜有机 P 含量(kg/hm²)。每一土层腐殖质中有机 P 的矿化采用下列方程描述:

$$HMP_l = \frac{(CMN)(ON_{al})(OP_l)(SWF_l * TF_M)^{0.5}(BD_l)^2}{(ON_l)(BDP_l)^2} \quad (40)$$

(40)式中, HMP 是腐殖质 P 矿化速率[kg/(hm²·d)], CMN 是腐殖化速率常数, BD 是土壤固定容重(t/m³), BDP 是受土壤耕作影响的当前容重(t/m³), ON 是土层中有机 N 含量(kg/hm²), OP 是土层中有机 P 的含量(kg/hm²)。

3.4 P 的固定

逐日 P 的固定量采用从微生物同化量中减去作物残茬中含有 P 的数量来计算:

$$WIP_l = (DCR_l)(FR_l)(0.16F_{ll} - CPFR) \quad (41)$$

(41)式中, WIP 是土层 l 中 P 固定速率

[$\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$], LF_l 是速效 P 固定因素, $CPFR$ 是作物残茬中 P 的浓度。速效 P 固定因素 LF_l 采用下式计算:

$$LF_l = 0.01 + 0.001CLP_l, \quad CLP_l \leq 10 \quad (42)$$

$$LF_l = 0.02, \quad CLP_l > 10 \quad (43)$$

3.5 矿质 P 循环

矿质 P 在速效态、有效矿质态和稳定态 3 个库之间转运。速效 P 库和有效矿质 P 库之间的流动受平衡方程的支配:

$$MPR_l = AP_l - MP_a \left(\frac{PSP_l}{1 - PSP_l} \right) \quad (44)$$

(44) 式中, MPR 是土层 l 中矿质 P 流动速率 [$\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$], MP_a 是矿质态 P 库中的数量 (kg/hm^2), PSP 是 P 吸附系数, 其定义为 P 最初快速吸附作用结束时肥料 P 保留在速效 P 库中的比例。在石灰性土壤上:

$$PSP_l = 0.58 - 0.0061CAC_l \quad (45)$$

在非石灰性、中度风化的土壤上:

$$PSP_l = 0.0054BSA_l + 0.116PH_l - 0.73 \quad (46)$$

(45)、(46) 式中, PSP 是土层 P 吸附系数, CAC 是 CaCO_3 浓度 (g/t), BSA 是醋酸铵法测定的离子饱和度 (%), PSP 限制在 0.05~0.75 的范围。

土层有效矿质库与稳定矿质库之间 P 的运转受下列方程支配:

$$ASPR_l = \omega_l(4MP_{al} - MP_{sl}) \quad (47)$$

(47) 式中, $ASPR$ 是土层有效矿质库与稳定矿质库之间 P 的转运速率 [$\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$], ω_l 是流动系数 (d), MP_s 是稳定矿质 P 数量 (kg/hm^2)。流动系数 ω 是 PSP 的函数:

对于非石灰土壤:

$$\omega_l = \exp(-1.77PSP_l - 7.05) \quad (48)$$

对于石灰性土壤:

$$\omega_l = 0.0076$$

4 作物氮磷营养的数学模拟

4.1 氮素营养^[10-13]

4.1.1 作物需氮与土壤供氮 作物逐日 N 需求是该天理想 N 含量与作物 N 含量的差值。需 N 量采用下式估计:

$$UND_i = CNB_i B_i - \sum_{k=1}^{i-1} UN_k \quad (49)$$

(49) 式中, UND 是作物 N 需求速率 [$\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$], CNB 是作物的最佳 N 浓度 (kg/t), B 是第 i 天积累的生物量 (t/hm^2), UN 是实际 N 吸收速率

[$\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$]。最佳作物 N 浓度可采用生长期的函数来计算:

$$CNB_i = bn_1 + bn_2 \exp(-bn_3 HUI_i) \quad (50)$$

(50) 式中, bn_1 、 bn_2 和 bn_3 分别为计算作物苗期、生长中期和成熟期最佳 N 浓度的作物参数^[35-37], HUI 是生长季节的比例。

假设土壤供 N 受到根系 NO_3^- -N 溶质流的制约:

$$UN_{l,i} = U_{l,i} \left[\frac{WNO3_l}{SW_l} \right]_i \quad (51)$$

(51) 式中, UN 是土壤供 N 速率 [$\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$], $WNO3$ 是 NO_3^- -N 数量 (kg/hm^2), SW 是土壤水分含量 (mm), U 是水分利用速率 (mm/d), 下标 l 表示土壤层次^[16,33]。总溶质流供给量是各土层供 N 量之和:

$$UNS_i = \sum_{l=1}^m UN_{l,i} \quad (52)$$

(52) 式中, UNS 是土壤向植物的供 N 速率 [$\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$]。

4.1.2 豆科作物固氮^[38-39] 豆科作物的逐日固氮采用占逐日植株 N 吸收量的比例来计算:

$$WFX_i = FXR_i * UN_i, \quad WFX \leq 6.0 \quad (53)$$

(53) 式中, WFX 是固氮量 (kg/hm^2), FXR 是第 i 天 N 吸收的比例, 采用土壤 NO_3 、水分含量和作物生长阶段的函数来计算^[22,40]:

$$FXR = \min(1.0, FXW, FXN) * FXG \quad (54)$$

(54) 式中, \min 表示取三者最小, FXG 是作物生长阶段因子, FXW 是土壤水分含量因子, FXN 是土壤 NO_3 含量因子。作物生长阶段因子采用下列方程计算:

$$FXG_i = 0.0, \quad HUI_i \leq 0.15, \quad HUI_i \geq 0.75$$

$$FXG_i = 6.67HUI_i - 1.0, \quad 0.15 < HUI_i \leq 0.3$$

$$FXG_i = 1.0, \quad 0.3 < HUI_i < 0.55 \quad (55)$$

$$FXG_i = 3.75 - 5.0HUI_i, \quad 0.55 < HUI_i < 0.75$$

(55) 式中, HUI 是描述作物生长阶段的热量单元系数, 由作物生长模型计算。

土壤水分含量因子 FXW 采用下式计算:

$$FXW_i = \frac{SW3_i - WP3}{0.85(FC3 - WP3)} \quad (56)$$

$$SW3 < 0.85(FC3 - WP3) + WP3$$

(56) 式中, $SW3$ 、 $WP3$ 和 $FC3$ 分别是第 i 天顶层 0.3m 土壤含水量、凋萎点含水量和田间持水量^[40]。

土壤 NO_3 因子 FXN 采用下式计算:

$$FXN = 0, \quad WNO3 > 300 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{m})$$

$$FXN = 1.5 - 0.005 \left(\frac{WNO3}{RD} \right),$$

$$100 < WNO3 \leq 300 \quad (57)$$

$$FXN = 1.0, WNO3 \leq 100 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{m})$$

(57) 式中, $WNO3$ 是根区 NO_3^- -N 重量 [$\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{m})$], RD 是根深(m)。

4.2 磷素营养^[32-34]

逐日作物需 P 计算采用下式:

$$UPD_i = CPB_i B_i - \sum_{k=1}^{i-1} UP_k \quad (58)$$

(58) 式中, UPD 是植株 P 需要量 (kg/hm^2), UP 是实际 P 吸收量 (kg/hm^2), CPB 是植株最佳 P 浓度。最佳植株 P 浓度采用下式表示:

$$CPB_i = bp_1 + bp_2 + \exp(-bp_3 HUI_i) \quad (59)$$

(59) 式中, bp_1 、 bp_2 和 bp_3 分别是作物苗期、生长中期和成熟期计算作物最佳 P 浓度的作物参数^[36-37]。

土壤供 P 采用下列方程计算:

$$UPS_i = 1.5 UPD_i \sum_{l=1}^M (LF_{ul})^l \left(\frac{RW_l}{RWT_i} \right) \quad (60)$$

(60) 式中, UPS 是土壤供 P 数量 (kg/hm^2), LF_u 是吸收 P 的速效 P 因子, RW 是土层中的根重 (kg/hm^2), RWT 是第 i 天总根重 (kg/hm^2)^[23-24, 31]。P 吸收的速效 P 因子取值范围为 0.1~1.0, 按照下式变化:

$$LF_{ul} = 0.1 + \frac{0.9 CLP_l}{CLP_l + \exp(8.01 - 0.360 CLP_l)} \quad (61)$$

(61) 式中, CLP 是土层中速效 P 浓度 (g/t), 当 CLP 大于 20 g/t 时, 方程(61) 允许取最佳吸收速率。

参考文献:

- [1] 鲁如坤, 刘鸿翔, 闻大中, 等. 我国典型地区农业生态系统养分循环与平衡研究 I. 农田养分支出参数[J]. 土壤通报, 1996, 27(4): 145-151.
- Lu R k, Liu H X, Wen D Z *et al.*. Study of nutrition cycling and balance of agroecosystem in typical areas of China: I. Parameters of field nutrition output[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1996, 27(4): 145-151.
- [2] 鲁如坤, 刘鸿翔, 闻大中, 等. 我国典型地区农业生态系统养分循环与平衡研究 III. 全国和典型地区养分循环和平衡现状[J]. 土壤通报, 1996, 27(5): 193-196.
- Lu R k, Liu H X, Wen D Z *et al.*. Study of nutrition cycling and balance of agroecosystem in typical areas of China: III. Situation of nutrition cycling and balance in typical areas and whole country[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1996, 27(5): 193-196.
- [3] 沈善敏, 殷秀岩, 张璐. 农业系统中磷肥残效及磷循环研究 I. 作物吸收磷量、磷肥残效及土壤有效磷的变化[J]. 应用生态学报, 1992, 3(2): 138-143.

Shen S M, Yin X Y, Zhang L. Residual effect of phosphorus fertilizer and phosphorus cycling in a farming system: I. Phosphorus uptake by

crops, residual effect of phosphorus fertilizer and changes of soil available phosphorus[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 1992, 3(2): 138-143.

- [4] 赵允格, 邵明安. 模拟降雨条件下成垄压实对硝态氮迁移的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(1): 45-49.
- Zhao Y G, Shao M A. Study on nitrogen movement under localized compaction and ridge tillage by use of artificial rainfall[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2003, 9(1): 45-49.
- [5] 刘建玲, 张福锁. 小麦—玉米轮作长期定位肥料试验中土壤磷库的变化 II. 土壤 Olsen-P 及其形态无机磷的变化[J]. 应用生态学报, 2000, 11(3): 365-368.
- Liu J L, Zhang F S. Dynamics of soil P pool in long term fertilizing experiment of wheat—maize rotation II. Dynamics of soil Olsen P and inorganic P[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2000, 11(3): 365-368.
- [6] 李世清, 李生秀. 半干旱地区农业生态系统硝态氮的淋失[J]. 应用生态学报, 2001, 11(2): 240-242.
- Li S Q, Li S X. Leaching loss of nitrate from semiarid area agroecosystem[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2001, 11(2): 240-242.
- [7] 张兴昌, 邵明安. 侵蚀泥沙、有机质和全氮富集规律研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12(4): 541-544.
- Zhang X C, Shao M A. Enrichment of organic matter and nitrogen in eroded bedrocks[J]. Chin. J. Appl. Ecol. 2001, 12(4): 541-544.
- [8] 曹巧红, 龚元石. 应用 Hydrus-1D 模型模拟分析冬小麦农田水分氮素运移特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(2): 139-145.
- Cao Q H, Gong Y S. Simulation and analysis of water balance and nitrogen leaching using Hydrus 1D under winter wheat crop[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2003, 9(2): 139-145.
- [9] Wisiol K, Hesketh J D. Plant growth modeling for resources management. Vol. I, current models and methods[M]. Boca Raton: CPC Press Inc., 1987.
- [10] Hanks J, Ritchie J T. Modeling plant and soil system[M]. Madison: ASSA, CSSA, SSSA, 1991.
- [11] Williams J R, Jones C A, Dyke P T. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity[J]. Trans. ASAE, 1984, 27: 129-144.
- [12] Shapley A N, Williams J R. EPIC—erosion/productivity impact calculator: 1. Model documentation[R]. U. S. Dept. Agric. Tech. Bull. No. 1768, 1990.
- [13] Williams J R. The EPIC model[R]. USDA—ARS, Grassland, Soil and Water Research Laboratory, 1995.
- [14] Shapley A N, Williams J R. EPIC—Erosion/productivity impact calculator: 2. User manual[R]. U. S. Dept. Agric. Tech. Bull. No. 1768, 1990.
- [15] Jones C A, Kiniry J R. CERES—maize, a simulation model of maize growth and development[M]. College Station: Texas A&M Univ. Press, 1986.
- [16] Arnold J G, Williams J R. SWRRB—a watershed scale model for soil and water resources management[A]. Singh V P(ed.). Computer models of watershed hydrology[M]. Water Resources Publication, 1995. 847-908.
- [17] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R *et al.* SWAT, soil and water assessment tool, theoretical documentation (version 2000) [M]. College Station: Texas Water Resources Institute, 2000.

- [18] Knisel W G. CREAMS, a field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems[R]. U. S. Dept. Agric. Conserv. Res. Rept. No. 26, 1980.
- [19] Hobbs J A, Thompson C A. Effect of cultivation on the nitrogen and organic carbon content of a Kansas argiustoll[J]. Agron. J., 1971, 63: 66-68
- [20] Jones C A, Ratliff L F, Dyke P T. Estimation of potentially mineralizable soil nitrogen from chemical and taxonomic criteria[J]. Commun. in Soil Sci. Plant Analy., 1982, 13(2): 75-86.
- [21] Cassman K G, Yumns D N. Nitrogen mineralization as affected by soil moisture, temperature, and depth[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1980, 44: 1233-1237.
- [22] Bouinok A, Cabelguenne M, Jones CA *et al.* Simulation of soybean nitrogen nutrition for a silty clay soil in southern France[J]. Field Crops Res., 1991, 26: 19-34.
- [23] Andrews R E, Newman E I. Root density and competition for nutrients[J]. Oecol. Plant, 1970, 5: 319-334.
- [24] Eavis B W. Soil physical conditions affecting seedling root growth. I. Mechanical impedance, aeration, and moisture availability as influenced by bulk density and moisture levels in a sandy ban soil[J]. Plant Soil, 1972, 36: 613-622.
- [25] Godwin D C, Jones C A, Ritchie J T *et al.* The water and nitrogen components of the CERES models[A]. Intl. Crops Research Institute for the Semi Arid Tropics. Proc. intl. symp. on minimum data sets for agrotechnology transfer[C]. India: Patancheru, 1984 95-100
- [26] Hanks R J. Yield and water-use relationships: An overview[A]. Taylor H M. Limitations to efficient water use in crop production[C]. Madison: ASA, CSSA, SSSA, 1983. 393-411.
- [27] Jarvis S C, Robson A D. The effect of nitrogen nutrition of plants on the development of acidity in western Australian soils. I. Effects with subterranean clover grown under leaching conditions[J]. Aust. J. Agric. Res., 1983, 34: 341-353
- [28] Jones C A. Effect of soil texture on critical bulk densities for root growth[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1983, 47: 1208-1211.
- [29] Seligman N G, Keulen H. PAPRAN: A simulation model of annual pasture production limited by rainfall and nitrogen[A]. Frissel M J, Veen J A. Simulation of nitrogen behaviour of soil-plant systems. proc. [C]. Wageningen: Workshop, 1981. 192-221.
- [30] Jones C A. Simulation of nitrogen response in Hydric Dystrandpts[A]. Assessment of Agrotechnology Transfer in a Network of Tropical Soil Families. Benchmark soils project progress report 3[R]. 1983 30-33.
- [31] DeJager A. Localized stimulation of root growth and phosphate uptake in *Zea mays* L. resulting from restricted phosphate supply[A]. Harley J L, Russell R S. The soil-root interface[M]. New York: Academic Press. 1979. 391-403
- [32] Jones C A, Cole C V, Sharpley A N *et al.* A simplified soil and plant phosphorus model. I. Documentation[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1984, 48(4): 800-805
- [33] Sharpley A N, Jones C A, Gray C. A simplified soil and plant phosphorus model: II. Prediction of labile, organic, and sorbed phosphorus[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1984, 48(4): 800-805.
- [34] Jones C A, Sharpley A N, Williams J R. A simplified soil and plant phosphorus model: III. Testing[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1984, 48(4): 810-813
- [35] Sharpley A N, Jones C A, Gray C. A detailed phosphorus characterization of seventy eight soils[R]. U. S. Dept. Agric., Agric. Res. Ser., ARS-31, 1985.
- [36] Jones C A. A survey of the variability in tissue nitrogen and phosphorus concentrations in maize and grain sorghum[J]. Field Crops Res., 1983, 6: 133-147.
- [37] Kiniry J R, Williams J R. EPIC crop parameters for vegetables for the nitrogen and phosphorus portions of the RCA analysis[R]. Memorandum, 1994.
- [38] Nyatsanga T, Pierre W H. Effect of nitrogen fixation by legumes on soil acidity[J]. Agron. J., 1973, 65: 936-940
- [39] Patterson T G, Larue T A. Nitrogen fixation by soybeans: Cultivars and seasonal effects and comparison of estimates[J]. Crop Sci., 1983, 23: 488-492.
- [40] Albrecht S L, Bennett S M, Boote K J. Relationship of nitrogenase activity to plant water stress in field-grown soybeans[J]. Field Crops Res., 1984, 8: 61-71.