



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 117746971 A

(43) 申请公布日 2024.03.22

(21) 申请号 202311251481.9

(22) 申请日 2023.09.26

(71) 申请人 铜仁学院

地址 554300 贵州省铜仁市碧江区川硐办事处教育园区启航路238号

申请人 中国科学院地球化学研究所
贵州省水利科学研究院

(72) 发明人 吴路华 白晓永 罗光杰 陈飞
张思蕊 陈丹 杨东妮 谢元欢

(74) 专利代理机构 贵阳中新专利商标事务所
52100

专利代理师 商小川

(51) Int. Cl.

G16B 5/00 (2019.01)

G16C 20/10 (2019.01)

权利要求书4页 说明书11页

(54) 发明名称

一种基于空间像元尺度的喀斯特植被生物量评估方法

(57) 摘要

本发明一种基于空间像元尺度的喀斯特植被生物量评估方法,包括:计算总初级生产力GPP;基于空间像元尺度的GPP扣除植被自养呼吸计算空间像元尺度上净初级生产力NPP;基于年平均温度和年平均降水量计算最大植被生物量;计算空间像元尺度上岩石化学风化溶蚀速率;基于不同类别岩石面积及各类岩石化学风化过程中单位面积P释放量计算研究区总的P释放量;计算空间像元尺度上生态系统所需P量;计算P限制状态下的最大植被生物量;计算各像元尺度上修正后的植被生物量;解决了喀斯特区地形地貌制约,养分P限制及其差异性释放状态下现有植被生物量评估方法无法实现空间区域化评估以及评估误差较大问题。

1. 一种基于空间像元尺度的喀斯特植被生物量评估方法,其特征在于:所述方法包括:
步骤1、计算空间像元尺度上GPP,通过分别计算阳叶GPP和阴叶GPP,并累加得到空间像元尺度上GPP

步骤2、计算空间像元尺度上NPP,基于GPP扣除植被自养呼吸,进而计算空间像元尺度上NPP;

步骤3、基于年平均温度和年平均降水量计算最大植被生物量;

步骤4、计算空间像元尺度上岩石化学风化溶蚀速率;

步骤5、计算各像元上岩石化学风化释放的P量;

步骤6、计算空间像元尺度上生态系统所需P量;

步骤7、计算P限制状态下的最大植被生物量;

步骤8、计算各像元尺度上修正后的植被生物量。

2. 根据权利要求1所述的一种基于空间像元尺度的喀斯特植被生物量评估方法,其特征在于:所述方法还包括:

步骤9、基于实测数据对修正后的植被最大生物量结果进行验证:

$$d = 1 - \frac{\sum_{n=1}^m (E_n - M_n)^2}{\sum_{n=1}^m \left(|E_n - \bar{M}| + |M_n - \bar{M}| \right)^2} \quad (33)$$

式中:d为模型满意度;m为所有测量值的个数; E_n 和 M_n 分别为第n个估计值和测量值的植被生物量值; \bar{M} 表示所有测量的植被生物量值的平均值。

3. 根据权利要求1所述的一种基于空间像元尺度的喀斯特植被生物量评估方法,其特征在于:分别基于空间像元尺度计算阳叶GPP和阴叶GPP并累加得到空间像元尺度上GPPGPP的方法包括:阳叶GPP和阴叶GPP是基于阳叶和阴叶的最大光照利用度、冠层上方入射的直接和漫射的光合活性辐射、水分胁迫、温度调节标量及大气中 CO_2 浓度计算:

$$GPP = GPP_{shade} + GPP_{sun} \quad (1)$$

$$GPP_{shade} = (\epsilon_{msh} \times APAR_{sh}) \times T_s \times W_s \times C_s \quad (2)$$

$$GPP_{sun} = (\epsilon_{msu} \times APAR_{su}) \times T_s \times W_s \times C_s \quad (3)$$

式中:GPP为总初级生产力; GPP_{shade} 为阴叶GPP; GPP_{sun} 为阳叶GPP; ϵ_{msu} 和 ϵ_{msh} 分别为阳叶和阴叶的最大光照利用度; $APAR_{su}$ 和 $APAR_{sh}$ 分别为阳叶和阴叶吸收的PAR; W_s 为水分胁迫; T_s 为温度调节标量; C_s 为光合作用时大气中 CO_2 浓度。

$APAR_{su}$ 和 $APAR_{sh}$ 的计算方法为:基于空间像元尺度的地表反照率、太阳天顶角、叶片倾角、聚集指数、阳叶和阴叶的LAI、天空清晰度指数和太阳辐射等参数计算冠层上方入射的直接和漫射的光合活性辐射进行计算:

$$APAR_{sh} = (1 - \alpha) \times \left(\frac{PAR_{dif} \times PAR_{dif,u}}{LAI} + C \right) \times LAI_{sh} \quad (4)$$

$$APAR_{su} = (1 - \alpha) \times \left(\frac{PAR_{dir} \times \cos \beta}{\cos \theta} + \frac{PAR_{dif,u}}{LAI} + C \right) \times LAI_{su} \quad (5)$$

$$LAI = 2 \cos \theta \times \left(1 - e^{-\frac{LAI \times \Omega}{2 \cos \theta}} \right) \quad (6)$$

$$LAI_{sh} = LAI - LAI_{su} \quad (7)$$

$$C = 0.07 \times \Omega \times PAR_{dir} \times (1.1 - 0.1LAI) e^{-\cos\theta} \quad (8)$$

$$PAR_{dif} = PAR \times (0.7527 + 3.8453R - 16.316R^2 + 18.962R^3 - 7.0802R^4) \quad (9)$$

$$PAR_{dir} = PAR - PAR_{dif} \quad (10)$$

$$PAR_{dif,u} = PAR_{dif} \times e^{\frac{0.5\Omega LAI}{\cos\theta}} \quad (11)$$

$$\overline{\cos\theta} = 0.537 + 0.025 \times LAI \quad (12)$$

α 为反照率; θ 为太阳天顶角; β 为叶角,设为 60° ; Ω 为聚集指数; C 为多次散射辐射; PAR_{dir} 和 PAR_{dif} 为冠层上方入射的直接和漫射的光合活性辐射; $PAR_{dir,u}$ 表示冠层下的漫射 PAR ; LAI_{su} 和 LAI_{sh} 分别是阳叶和阴叶的 LAI ; R 表示天空清晰度指数,等于 $S/(S_0 \cos\theta)$; S 为太阳辐射; S_0 为太阳常数; $\overline{\theta}$ 是漫辐射天顶角;

温度调节标量 T_s 的计算方法为:基于植被光合作用的最高温度、最低温度和最适温度计算得到;

$$T_s = \frac{(T - T_{max}) \times (T - T_{min})}{(T - T_{max}) \times (T - T_{min}) - (T - T_{opt})^2} \quad (13)$$

式中: T_s 为温度调节标量,植被光合作用的最高温度和最低温度分别设置为 $313.15K$ 和 $273.15K$;植物光合作用的最适温度为不同植被类型的平均值;

水分胁迫量 W_s 的计算方法为:基于VPD、比湿度、饱和蒸气压及空气温度等计算得到:

$$W_s = \frac{VPD_{max} - VPD}{VPD_{max} - VPD_{min}} \quad (14)$$

$$VPD = VP_{sat} - spfh \times \frac{pres/1000}{0.622 + spfh \times 0.378} \quad (15)$$

$$VP_{sat} = 0.61121 \times e^{\left(18.678 - \frac{t_{air}}{234.5}\right) \times \frac{t_{air}}{257.14 - t_{air}}} \quad (16)$$

式中: W_s 为水分胁迫量, VPD_{max} 和 VPD_{min} 分别为GPP达到最大值和最小值时的VPD;如果VPD的值大于或等于 VPD_{max} ,则 W_s 等于0;如果VPD的值小于或等于 VPD_{min} ,则 W_s 等于1,其中 t_{air} 是 $^\circ C$ 单位的空气温度; VP_{sat} 表示饱和蒸汽压, $spfh$ 表示比湿度, $pres$ 表示压力;

光合作用时大气 CO_2 浓度 C_s 的计算方法为:基于无暗呼吸时的 CO_2 补偿点、 CO_2 的细胞间浓度、Rubisco米氏方程系数、 O_2 分压和摩尔气体常数计算得到:

$$C_s = \frac{C_i - \Gamma^*}{C_i + 2\Gamma^*} \quad (17)$$

$$\Gamma^* = 4.22 \times e^{\frac{37830(T-298.15)}{298.15RT}} \quad (18)$$

$$C_i = C_a \times \chi \quad (19)$$

$$\chi = \frac{\xi}{\xi + \sqrt{VPD}} \quad (20)$$

$$\xi = \sqrt{\frac{356.51K}{1.6\eta^*}} \quad (21)$$

$$K = K_c \times \left(1 + \frac{P_o}{K_o}\right) \quad (22)$$

$$K_c = 39.97 \times e^{\frac{79.43 \times (T-298.15)}{298.15RT}} \quad (23)$$

$$K_o = 27480 \times e^{\frac{36.38 \times (T-298.15)}{298.15RT}} \quad (24)$$

式中： C_s 为光合作用时大气中 CO_2 浓度； Γ^* 是无暗呼吸时 CO_2 补偿点； C_i 是 CO_2 的细胞间浓度； C_a 为大气 CO_2 浓度； χ 为叶内 CO_2 与环境 CO_2 的比值； K 为Rubisco米氏方程系数； η^* 是相对于25℃时的水的粘度； K_c 和 K_o 分别是Rubisco对 CO_2 和 O_2 的米氏方程系数； P_o 是 O_2 分压； R 为摩尔气体常数。

4. 根据权利要求1所述的一种基于空间像元尺度的喀斯特植被生物量评估方法，其特征在于：计算空间像元尺度上NPP的方法为：

$$NPP = GPP - R_a \quad (25)$$

$$R_a = 0.68GPP + 81.90 \quad (26)$$

式中： GPP 为总初级生产力； NPP 为净初级生产力； R_a 为自养呼吸。

5. 根据权利要求1所述的一种基于空间像元尺度的喀斯特植被生物量评估方法，其特征在于：空间各像元上各年份最大植被生物量的计算方法为：

$$B_{\max}(MAT, MAP) = 3442.194 \times \frac{0.05 + \exp(0.000158MAP)}{1 + \exp(-0.037 \times (MAT - 95.606))} + 33.128 \quad (27)$$

式中： B_{\max} 为估算的空间各像元上各年份最大植被生物量； MAT 是年平均温度， MAP 是年平均降水量。

6. 根据权利要求1所述的一种基于空间像元尺度的喀斯特植被生物量评估方法，其特征在于：计算空间像元尺度上岩石化学风化溶蚀速率的方法为：通过碳酸盐岩化学风化过程中从岩石内部释放的 HCO_3^- 浓度来表征溶蚀速率：

$$CWR_{HCO_3^-} = 10^6 (P - E) (K_s K_1 K_0 / 4K_2 \gamma_{Ca^{2+}} \gamma_{(HCO_3^-)^2})^{1/3} (pCO_2)^{1/3} \quad (28)$$

式中： $CWR_{HCO_3^-}$ 为各像元中碳酸盐岩化学风化岩石内部释放的 HCO_3^- 速率， P 、 E 分别为降雨及实际蒸散发量； K_s 为碳酸钙溶度积常数； K_1 为 CO_2 水解为 HCO_3^- 的平衡常数； K_0 为 CO_2 溶于水的平衡常数； K_2 为 CO_3^{2-} 形成的平衡常数； $\gamma_{Ca^{2+}}$ 及 $\gamma_{HCO_3^-}$ 分别为含水层中 Ca^{2+} 及 HCO_3^- 的离子活度系数； pCO_2 为土壤含水层中 CO_2 的分压。

7. 根据权利要求1所述的一种基于空间像元尺度的喀斯特植被生物量评估方法，其特征在于：计算各像元上岩石化学风化释放的 P 量的方法为：

$$P_r = P_i \times S \times \frac{CWR_{HCO_3^- i}}{CWR_{HCO_3^- tot}} \times S_i \quad (29)$$

式中： P_r 为各像元上岩石化学风化释放的 P ； P_i 为各类岩石化学风化过程中单位面积 P 释

放量; $CWR_{HCO_3^-}$ 为各像元中碳酸盐岩化学风化岩石内部释放的 HCO_3^- 速率; $CWR_{HCO_3^-,tot}$ 为研究区碳酸盐岩化学风化岩石内部释放的 HCO_3^- 速率; S_i 为像元面积; S 为研究区面积。

8. 根据权利要求1所述的一种基于空间像元尺度的喀斯特植被生物量评估方法, 其特征在于: 空间像元尺度上生态系统所需P量计算方法为: 据植被生物量中C储量及各部位含C量与C/P配额比计算当前植被生物量所需的P, 考虑到不同植被类型的差异, 将对各植被类型进行测算。所需的P为

$$P_d = \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n \frac{NPP_i}{PR_i} \times (C_{L,i}/(C/P)_{L,i} + C_{S,i}/(C/P)_{S,i} + C_{C,i}/(C/P)_{C,i} + C_{F,i}/(C/P)_{F,i}) \quad (30)$$

式中: P_d 为生态系统中各像元上所需P的量, n 为生态系统中植被类型数量, 植被生物量 i 为第 i 种植被类型中某个像元的植被生物量值; NPP_i 为空间各像元上净初级生产力; PR_i 为第 i 种植被类型P吸收效率; $C_{L,i}$ 为第 i 种植被类型植被生物量形成过程中叶片C的比例; $(C/P)_{L,i}$ 为第 i 种植被类型植被生物量形成过程中叶片C/P比例; $C_{S,i}$ 为第 i 种植被类型植被生物量形成过程中茎秆C的比例; $(C/P)_{S,i}$ 为第 i 种植被类型植被生物量形成过程中茎秆C/P比例; $C_{C,i}$ 为第 i 种植被类型植被生物量形成过程中粗根C的比例; $(C/P)_{C,i}$ 为第 i 种植被类型植被生物量形成过程中粗根C/P比例; $C_{F,i}$ 为第 i 种植被类型植被生物量形成过程中细根C的比例; $(C/P)_{F,i}$ 为第 i 种植被类型植被生物量形成过程中细根C/P比例。

9. 根据权利要求1所述的一种基于空间像元尺度的喀斯特植被生物量评估方法, 其特征在于: P限制状态下的最大植被生物量的计算方法为:

$$rB_{max} = NPP/c \times P_r/P_d \quad (31)$$

式中: rB_{max} 为基于岩石化学风化释放的P含量而估算的空间各像元上各年份最大植被生物量; NPP 为净初级生产力; c 为含碳量因子。

10. 根据权利要求1所述的一种基于空间像元尺度的喀斯特植被生物量评估方法, 其特征在于: 计算各像元尺度上修正后的植被生物量的方法为: 对于没有受到P限制的地区的植被生物量将继续采用步骤3中计算的结果, 而受到P限制的地区则用P限制状态下的植被生物量代替:

$$fB_{max} = \min(rB_{max}, B_{max}) \quad (32)$$

式中: B_{max} 为估算的空间各像元上各年份最大植被生物量; rB_{max} 为基于岩石化学风化释放P含量估算的最大植被生物量; fB_{max} 为P限制状态修正的最大植被生物量。

一种基于空间像元尺度的喀斯特植被生物量评估方法

技术领域

[0001] 本发明属于植被生物量评估技术领域,尤其涉及一种基于空间像元尺度的喀斯特植被生物量评估方法。

背景技术

[0002] 植被生物量是指某一时刻单位面积内实存生活的有机物质(干重)(包括生物体内所存食物的重量)总量,是植被生态系统结构优劣和功能高低的最直接的表现和生态系统环境质量的综合体现,表征着陆地植被动态演变及恢复效益。喀斯特区具有独特的垂直立体地形特征,坡度坡向空间差异比非喀斯特地区更加显著,接收到的太阳辐射与地表反照率差异可能影响植被生长,进而影响植被生物量增长累积。从光能利用率角度考虑,植被冠层的阳叶和阴叶吸收辐射的能力可能会有很大的不同。阳叶能够吸收到达植被冠层的直接辐射和散射辐射,阴叶仅吸收散射辐射,阳叶容易达到光饱和导致光能利用率较低,阴叶往往处于光亏缺而光能利用率较高。然而,现有的两叶光能利用率模型(TL-LUE模型)是假设冠层为一个大的叶片,忽略了阴叶和阳叶光能利用率的差异及其引起的生物量积累过程机制区别。

[0003] 此外,陆地植被生物量增长还受到氮(N)、磷(P)元素可利用性的限制,N被用来合成吸收光线的色素叶绿素,而P则用来合成蛋白质。在自然界中,植物主要通过微生物固N过程和大气N沉降来获取N素,而自然界的P主要来自物理搬运和化学风化过程。尽管P限制(或N、P共同限制)在整个陆地生物圈中广泛存在并且预计在未来会增加,但P限制对未来气候碳周期反馈的潜在影响在很大程度上是未知的。现今N限制越来越多地被纳入全球模型中,但明确考虑P限制的情况并不多见。例如,IPCC-CMIP5的15个模型中,只有两个模型(CESM1-BGC和NorESM1-M)考虑到N限制对植物生长造成的影响,而没有一个模型考虑过P限制。研究发现,模型模拟的植被生物量增长所需的营养量大大超过了自然界养分的供应速率,这表明模型预测的过高的生产力增长可能不切实际。在喀斯特区,由于喀斯特区岩溶水文地质背景,自然状态下养分P(磷)基本是由该区域碳酸盐岩化学风化过程释放,而缓慢的岩石化学风化过程必将导致P释放量缺少,因而水热优厚条件下植被生长与光合作用可能已经受到了P的严重限制,而现有的用于喀斯特山区的植被生物量模型并没有考虑P限制状态下的植被生产潜力,导致喀斯特山区植被生物量量测算存在极大的不确定性。

[0004] 因此,在坡度坡向差异较大且拥有高度异质性地垫面背景的喀斯特山区,阴叶和阳叶光能利用率存在的明显差异,碳酸盐岩性基底控制背景下P缺乏以及较大的P释放差异特征导致植被生长和光合作用过程可能处于受P限制的状态,这必然会导致模拟测算的植被生物量存在较大的不确定性。此外,传统方法中对植被生物量的调查、监测和评估多局限于样地、样方或某个特殊植被物种,调查时间较长,耗费精力,效率低下,更无法获取空间区域上的植被生物量,进而难以监测到区域上植被生物量变化特征。因此,本发明基于遥感技术和水文地球化学过程模型提出一种基于空间像元尺度的喀斯特植被生物量评估方法,以解决喀斯特区地形地貌制约,养分P限制及其差异性释放状态下现有植被生物量评估方法

无法实现空间区域化评估以及评估误差较大的技术缺陷问题。

发明内容:

[0005] 本发明要解决的技术问题是:提供一种基于空间像元尺度的喀斯特植被生物量评估方法,以解决喀斯特区地形地貌制约,养分P限制及其差异性释放状态下现有植被生物量评估方法无法实现空间区域化评估以及评估误差较大的技术缺陷问题。

[0006] 本发明技术方案是:

[0007] 一种基于空间像元尺度的喀斯特植被生物量评估方法,所述方法包括:

[0008] 步骤1、计算空间像元尺度上GPP,通过分别计算阳叶GPP和阴叶GPP,并累加得到空间像元尺度上GPP

[0009] 步骤2、计算空间像元尺度上NPP,基于GPP扣除植被自养呼吸,进而计算空间像元尺度上NPP;

[0010] 步骤3、基于年平均温度和年平均降水量计算最大植被生物量;

[0011] 步骤4、计算空间像元尺度上岩石化学风化溶蚀速率;

[0012] 步骤5、计算各像元上岩石化学风化释放的P量;

[0013] 步骤6、计算空间像元尺度上生态系统所需P量;

[0014] 步骤7、计算P限制状态下的最大植被生物量;

[0015] 步骤8、计算各像元尺度上修正后的植被生物量。

[0016] 所述方法还包括:

[0017] 步骤9、基于实测数据对修正后的植被最大生物量结果进行验证:

$$[0018] \quad d = 1 - \frac{\sum_{n=1}^m (E_n - M_n)^2}{\sum_{n=1}^m (|E_n - \bar{M}| + |M_n - \bar{M}|)^2} \quad (33)$$

[0019] 式中:d为模型满意度;m为所有测量值的个数; E_n 和 M_n 分别为第n个估计值和测量值的植被生物量值; \bar{M} 表示所有测量的植被生物量值的平均值。

[0020] 分别基于空间像元尺度计算阳叶GPP和阴叶GPP并累加得到空间像元尺度上GPPGPP的方法包括:阳叶GPP和阴叶GPP是基于阳叶和阴叶的最大光照利用度、冠层上方入射的直接和漫射的光合活性辐射、水分胁迫、温度调节标量及大气中 CO_2 浓度计算:

$$[0021] \quad GPP = GPP_{shade} + GPP_{sun} \quad (1)$$

$$[0022] \quad GPP_{shade} = (\epsilon_{msh} \times APAR_{sh}) \times T_s \times W_s \times C_s \quad (2)$$

$$[0023] \quad GPP_{sun} = (\epsilon_{msu} \times APAR_{su}) \times T_s \times W_s \times C_s \quad (3)$$

[0024] 式中:GPP为总初级生产力; GPP_{shade} 为阴叶GPP; GPP_{sun} 为阳叶GPP; ϵ_{msu} 和 ϵ_{msh} 分别为阳叶和阴叶的最大光照利用度; $APAR_{su}$ 和 $APAR_{sh}$ 分别为阳叶和阴叶吸收的PAR; W_s 为水分胁迫; T_s 为温度调节标量; C_s 为光合作用时大气中 CO_2 浓度。

[0025] $APAR_{su}$ 和 $APAR_{sh}$ 的计算方法为:基于空间像元尺度的地表反照率、太阳天顶角、叶片倾角、聚集指数、阳叶和阴叶的LAI、天空清晰度指数和太阳辐射等参数计算冠层上方入射的直接和漫射的光合活性辐射进行计算:

$$[0026] \quad APAR_{sh} = (1 - \alpha) \times \left(\frac{PAR_{dif} \times PAR_{dif,u}}{LAI} + C \right) \times LAI_{sh} \quad (4)$$

$$[0027] \quad APAR_{su} = (1-\alpha) \times \left(\frac{PAR_{dir} \times \cos \beta}{\cos \theta} + \frac{PAR_{dif,u}}{LAI} + C \right) \times LAI_{su} \quad (5)$$

$$[0028] \quad LAI = 2 \cos \theta \times \left(1 - e^{-\frac{LAI \times \Omega}{2 \cos \theta}} \right) \quad (6)$$

$$[0029] \quad LAI_{sh} = LAI - LAI_{su} \quad (7)$$

$$[0030] \quad C = 0.07 \times \Omega \times PAR_{dir} \times (1.1 - 0.1LAI) e^{-\cos \theta} \quad (8)$$

$$[0031] \quad PAR_{dif} = PAR \times (0.7527 + 3.8453R - 16.316R^2 + 18.962R^3 - 7.0802R^4) \quad (9)$$

$$[0032] \quad PAR_{dir} = PAR - PAR_{dif} \quad (10)$$

$$[0033] \quad PAR_{dif,u} = PAR_{dif} \times e^{\frac{0.5\Omega LAI}{\cos \theta}} \quad (11)$$

$$[0034] \quad \cos \bar{\theta} = 0.537 + 0.025 \times LAI \quad (12)$$

[0035] α 为反照率; θ 为太阳天顶角; β 为叶角,设为 60° ; Ω 为聚集指数; C 为多次散射辐射; PAR_{dir} 和 PAR_{dif} 为冠层上方入射的直接和漫射的光合活性辐射; $PAR_{dir,u}$ 表示冠层下的漫射PAR; LAI_{su} 和 LAI_{sh} 分别是阳叶和阴叶的LAI; R 表示天空清晰度指数,等于 $S/(S_0 \cos \theta)$; S 为太阳辐射; S_0 为太阳常数; $\bar{\theta}$ 是漫辐射天顶角;

[0036] 温度调节标量 T_s 的计算方法为:基于植被光合作用的最高温度、最低温度和最适温度计算得到;

$$[0037] \quad T_s = \frac{(T - T_{max}) \times (T - T_{min})}{(T - T_{max}) \times (T - T_{min}) - (T - T_{opt})^2} \quad (13)$$

[0038] 式中: T_s 为温度调节标量,植被光合作用的最高温度和最低温度分别设置为313.15K和273.15K;植物光合作用的最适温度为不同植被类型的平均值;

[0039] 水分胁迫量 W_s 的计算方法为:基于VPD、比湿度、饱和蒸气压及空气温度等计算得到:

$$[0040] \quad W_s = \frac{VPD_{max} - VPD}{VPD_{max} - VPD_{min}} \quad (14)$$

$$[0041] \quad VPD = VP_{sat} - spfh \times \frac{pres/1000}{0.622 + spfh \times 0.378} \quad (15)$$

$$[0042] \quad VP_{sat} = 0.61121 \times e^{\left(18.678 - \frac{t_{air}}{234.5} \right) \times \frac{t_{air}}{257.14 - t_{air}}} \quad (16)$$

[0043] 式中: W_s 为水分胁迫量, VPD_{max} 和 VPD_{min} 分别为GPP达到最大值和最小值时的VPD;如果VPD的值大于或等于 VPD_{max} ,则 W_s 等于0;如果VPD的值小于或等于 VPD_{min} ,则 W_s 等于1,其中 t_{air} 是 $^\circ C$ 单位的空气温度; VP_{sat} 表示饱和蒸气压, $spfh$ 表示比湿度, $pres$ 表示压力;

[0044] 光合作用时大气 CO_2 浓度 C_s 的计算方法为:基于无暗呼吸时的 CO_2 补偿点、 CO_2 的细胞间浓度、Rubisco米氏方程系数、 O_2 分压和摩尔气体常数计算得到:

$$[0045] \quad C_s = \frac{C_i - \Gamma^*}{C_i + 2\Gamma^*} \quad (17)$$

$$[0046] \quad \Gamma^* = 4.22 \times e^{\frac{37830(T-298.15)}{298.15RT}} \quad (18)$$

$$[0047] \quad C_i = C_a \times \chi \quad (19)$$

$$[0048] \quad \chi = \frac{\xi}{\xi + \sqrt{VPD}} \quad (20)$$

$$[0049] \quad \xi = \sqrt{\frac{356.51K}{1.6\eta^*}} \quad (21)$$

$$[0050] \quad K = K_c \times \left(1 + \frac{P_o}{K_o}\right) \quad (22)$$

$$[0051] \quad K_c = 39.97 \times e^{\frac{79.43 \times (T-298.15)}{298.15RT}} \quad (23)$$

$$[0052] \quad K_o = 27480 \times e^{\frac{36.38 \times (T-298.15)}{298.15RT}} \quad (24)$$

[0053] 式中： C_s 为光合作用时大气中 CO_2 浓度； Γ^* 是无暗呼吸时 CO_2 补偿点； C_i 是 CO_2 的细胞间浓度； C_a 为大气 CO_2 浓度； χ 为叶内 CO_2 与环境 CO_2 的比值； K 为Rubisco米氏方程系数； η^* 是相对于25℃时的水的粘度； K_c 和 K_o 分别是Rubisco对 CO_2 和 O_2 的米氏方程系数； P_o 是 O_2 分压； R 为摩尔气体常数。

[0054] 计算空间像元尺度上NPP的方法为：

$$[0055] \quad NPP = GPP - R_a \quad (25)$$

$$[0056] \quad R_a = 0.68GPP + 81.90 \quad (26)$$

[0057] 式中： GPP 为总初级生产力； NPP 为净初级生产力； R_a 为自养呼吸。

[0058] 空间各像元上各年份最大植被生物量的计算方法为：

$$[0059] \quad B_{\max}(MAT, MAP) = 3442.194 \times \frac{0.05 + \exp(0.000158MAP)}{1 + \exp(-0.037 \times (MAT - 95.606))} + 33.128 \quad (27)$$

[0060] 式中： B_{\max} 为估算的空间各像元上各年份最大植被生物量； MAT 是年平均温度， MAP 是年平均降水量。

[0061] 计算空间像元尺度上岩石化学风化溶蚀速率的方法为：通过碳酸盐岩化学风化过程中从岩石内部释放的 HCO_3^- 浓度来表征溶蚀速率：

$$[0062] \quad CWR_{HCO_3^-} = 10^6 (P - E) (K_s K_1 K_0 / 4K_2 \gamma_{Ca^{2+}} \gamma_{(HCO_3^-)^2})^{1/3} (pCO_2)^{1/3} \quad (28)$$

[0063] 式中： $CWR_{HCO_3^-}$ 为各像元中碳酸盐岩化学风化岩石内部释放的 HCO_3^- 速率， P 、 E 分别为降雨及实际蒸散发量； K_s 为碳酸钙溶度积常数； K_1 为 CO_2 水解为 HCO_3^- 的平衡常数； K_0 为 CO_2 溶于水的平衡常数； K_2 为 CO_3^{2-} 形成的平衡常数； $\gamma_{Ca^{2+}}$ 及 $\gamma_{HCO_3^-}$ 分别为含水层中 Ca^{2+} 及 HCO_3^- 的离子活度系数； pCO_2 为土壤含水层中 CO_2 的分压。

[0064] 计算各像元上岩石化学风化释放的 P 量的方法为：

$$[0065] \quad P_r = P_i \times S \times \frac{CWR_{HCO_3^-,i}}{CWR_{HCO_3^-,tot}} \times S_i \quad (29)$$

[0066] 式中： P_r 为各像元上岩石化学风化释放的 P ； P_i 为各类岩石化学风化过程中单位面

积P释放量； $CWR_{HCO_3^-}$ 为各像元中碳酸盐岩化学风化岩石内部释放的 HCO_3^- 速率； $CWR_{HCO_3^-,tot}$ 为研究区碳酸盐岩化学风化岩石内部释放的 HCO_3^- 速率； S_i 为像元面积； S 为研究区面积。

[0067] 空间像元尺度上生态系统所需P量计算方法为：据植被生物量中C储量及各部位含C量与C/P配额比计算当前植被生物量所需的P，考虑到不同植被类型的差异，将对各植被类型进行测算。所需的P为

$$[0068] \quad P_d = \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n \frac{NPP_i}{PR_i} \times (C_{L,i}/(C/P)_{L,i} + C_{S,i}/(C/P)_{S,i} + C_{C,i}/(C/P)_{C,i} + C_{F,i}/(C/P)_{F,i}) \quad (30)$$

[0069] 式中： P_d 为生态系统中各像元上所需P的量， n 为生态系统中植被类型数量，植被生物量 i 为第 i 种植被类型中某个像元的植被生物量值； NPP_i 为空间各像元上净初级生产力； PR_i 为第 i 种植被类型P吸收效率； $C_{L,i}$ 为第 i 种植被类型植被生物量形成过程中叶片C的比例； $(C/P)_{L,i}$ 为第 i 种植被类型植被生物量形成过程中叶片C/P比例； $C_{S,i}$ 为第 i 种植被类型植被生物量形成过程中茎秆C的比例； $(C/P)_{S,i}$ 为第 i 种植被类型植被生物量形成过程中茎秆C/P比例； $C_{C,i}$ 为第 i 种植被类型植被生物量形成过程中粗根C的比例； $(C/P)_{C,i}$ 为第 i 种植被类型植被生物量形成过程中粗根C/P比例； $C_{F,i}$ 为第 i 种植被类型植被生物量形成过程中细根C的比例； $(C/P)_{F,i}$ 为第 i 种植被类型植被生物量形成过程中细根C/P比例。

[0070] P限制状态下的最大植被生物量的计算方法为：

$$[0071] \quad rB_{max} = NPP/c \times P_r/P_d \quad (31)$$

[0072] 式中： rB_{max} 为基于岩石化学风化释放的P含量而估算的空间各像元上各年份最大植被生物量； NPP 为净初级生产力； c 为含碳量因子。

[0073] 计算各像元尺度上修正后的植被生物量的方法为：对于没有受到P限制的地区的植被生物量将继续采用步骤3中计算的结果，而受到P限制的地区则用P限制状态下的植被生物量代替：

$$[0074] \quad fB_{max} = \min(rB_{max}, B_{max}) \quad (32)$$

[0075] 式中： B_{max} 为估算的空间各像元上各年份最大植被生物量； rB_{max} 为基于岩石化学风化释放P含量估算的最大植被生物量； fB_{max} 为P限制状态修正的最大植被生物量。

[0076] 本发明有益效果：

[0077] 本发明在综合考虑喀斯特山区地形地貌、阳叶、阴叶不同光能利用效率差异及P限制状态背景下，基于多源遥感参数改进创建适用于喀斯特山区的喀斯特植被生物量动态模拟与测算评估模型，可准确揭示喀斯特山区植被生物量固持潜力、动态演变特征及其对区域碳中和目标支撑力度。

[0078] 本发明为了解决喀斯特山区受阴叶和阳叶光能利用率存在的明显差异以及自然界P限制及岩溶化学风化导致P差异性释放的影响，进而导致喀斯特山区植被生物量测算存在极大不确定性的问题，本发明综合考虑喀斯特山区独特的垂直立体地形特征和坡度坡向空间差异及岩溶化学风化过程制约下生态系统P限制等关键瓶颈，创建适用于喀斯特区P限制状态下植被生物量动态模拟测算模型。该方法是基于多源参数修正的两叶光能利用率模型，在考虑岩溶化学风化过程中P释放特征对植被碳汇评估方法进行二次修正，最后建立基于阴叶和阳叶光能利用差异及P限制状态下植被生物量潜力评估模型。此外，本发明针对传统方法中对植被生物量的调查、监测和评估多局限于样地、样方或某个特殊植被物种，调查

时间较长,耗费精力,效率低下,更无法获取空间区域上的植被生物量,进而难以监测到区域上植被生物量变化特征。因此,本发明基于遥感技术和水文地球化学过程模型提出一种基于空间像元尺度的喀斯特植被生物量评估方法,以解决喀斯特区地形地貌制约,养分P限制及其差异性释放状态下现有植被生物量评估方法无法实现空间区域化评估以及评估误差较大的技术缺陷问题。本发明能够科学合理、精确、快速高效地将测算喀斯特地区植被生物量潜力,不但考虑了垂直立体地形和坡度坡向空间差异特征,解决了喀斯特区地形地貌制约,同时也考虑了养分P限制状态导致植被生物量增长的限制问题,实现了地形地貌和养分P限制及其差异性释放状态下现有植被生物量评估方法无法实现空间区域化评估以及评估误差较大的技术缺陷问题。

具体实施方式:

[0079] 一种基于空间像元尺度的喀斯特植被生物量评估方法,它包括:具体包括:

[0080] 步骤1、计算空间像元尺度上GPP。其目的是为了计算空间像元尺度上NPP,通过NPP计算植被C含量,进而根据植被根茎叶各部位C/P比例获取植被生长所需P含量。GPP的计算主要是通过分别计算阳叶GPP和阴叶GPP,并将其累加。阳叶GPP和阴叶GPP是基于阳叶和阴叶的最大光照利用度、冠层上方入射的直接和漫射的光合活性辐射、水分胁迫、温度调节标量及大气中CO₂浓度计算而得。

$$[0081] \quad GPP = GPP_{shade} + GPP_{sun} \quad (1)$$

$$[0082] \quad GPP_{shade} = (\epsilon_{msh} \times APAR_{sh}) \times T_s \times W_s \times C_s \quad (2)$$

$$[0083] \quad GPP_{sun} = (\epsilon_{msu} \times APAR_{su}) \times T_s \times W_s \times C_s \quad (3)$$

[0084] 式中:GPP为总初级生产力(g C m⁻²yr⁻¹),GPP_{shade}为阴叶GPP(g C m⁻²yr⁻¹),GPP_{sun}为阳叶GPP(g C m⁻²yr⁻¹), ϵ_{msu} 和 ϵ_{msh} 分别为阳叶和阴叶的最大光照利用度(详见表1),APAR_{su}和APAR_{sh}分别为阳叶和阴叶吸收的PAR;W_s为水分胁迫;T_s为温度调节标量;C_s为光合作用时大气中CO₂浓度(ppm)。

[0085] (1) 计算APAR_{su}和APAR_{sh}。通过地表反照率、太阳天顶角、叶片倾角、聚集指数、阳叶和阴叶的LAI、天空清晰度指数和太阳辐射等参数计算冠层上方入射的直接和漫射的光合活性辐射。

$$[0086] \quad APAR_{sh} = (1 - \alpha) \times \left(\frac{PAR_{dif} \times PAR_{dif,u}}{LAI} + C \right) \times LAI_{sh} \quad (4)$$

$$[0087] \quad APAR_{su} = (1 - \alpha) \times \left(\frac{PAR_{dir} \times \cos \beta}{\cos \theta} + \frac{PAR_{dif,u}}{LAI} + C \right) \times LAI_{su} \quad (5)$$

$$[0088] \quad LAI = 2 \cos \theta \times \left(1 - e^{-\frac{LAI \times \Omega}{2 \cos \theta}} \right) \quad (6)$$

$$[0089] \quad LAI_{sh} = LAI - LAI_{su} \quad (7)$$

$$[0090] \quad C = 0.07 \times \Omega \times PAR_{dir} \times (1.1 - 0.1LAI) e^{-\cos \theta} \quad (8)$$

$$[0091] \quad PAR_{dif} = PAR \times (0.7527 + 3.8453R - 16.316R^2 + 18.962R^3 - 7.0802R^4) \quad (9)$$

$$[0092] \quad PAR_{dir} = PAR - PAR_{dif} \quad (10)$$

$$[0093] \quad PAR_{dif,u} = PAR_{dif} \times e^{\frac{0.5\Omega LAI}{\cos\bar{\theta}}} \quad (11)$$

$$[0094] \quad \cos\bar{\theta} = 0.537 + 0.025 \times LAI \quad (12)$$

[0095] 其中, α 为反照率; θ 为太阳天顶角; β 为叶角,设为 60° ; Ω 为聚集指数(详见表1); C 为多次散射辐射(Wm^{-2}); PAR_{dir} 和 PAR_{dif} (Wm^{-2})为冠层上方入射的直接和漫射的光合活性辐射; $PAR_{dir,u}$ (Wm^{-2})表示冠层下的漫射PAR; LAI_{su} 和 LAI_{sh} 分别是阳叶和阴叶的LAI; R 表示天空清晰度指数,等于 $S/(S_0\cos\theta)$,其中, S 为太阳辐射(Wm^{-2}), S_0 为太阳常数($1367Wm^{-2}$); $\bar{\theta}$ 是漫辐射天顶角。

[0096] (2) 计算温度调节标量(T_s)。温度调节标量是计算空间像元尺度上GPP的基本参数,它是基于植被光合作用的最高温度、最低温度和最适温度计算而得。

$$[0097] \quad T_s = \frac{(T - T_{max}) \times (T - T_{min})}{(T - T_{max}) \times (T - T_{min}) - (T - T_{opt})^2} \quad (13)$$

[0098] 式中: T_s 为温度调节标量,植被光合作用的最高温度(T_{max})和最低温度(T_{min})分别设置为313.15K和273.15K。植物光合作用的最适温度(T_{opt})为不同植被类型的平均值(详见表1)。

[0099] (3) 计算水分胁迫量(W_s)。水分胁迫量是计算空间像元尺度上GPP的基本参数,是基于VPD、比湿度、饱和蒸气压及空气温度等计算而得。

$$[0100] \quad W_s = \frac{VPD_{max} - VPD}{VPD_{max} - VPD_{min}} \quad (14)$$

$$[0101] \quad VPD = VP_{sat} - spfh \times \frac{pres/1000}{0.622 + spfh \times 0.378} \quad (15)$$

$$[0102] \quad VP_{sat} = 0.61121 \times e^{\left(\frac{18.678 - \frac{t_{air}}{234.5}}{257.14 - t_{air}} \right)} \quad (16)$$

[0103] 式中: W_s 为水分胁迫量, VPD_{max} 和 VPD_{min} 分别为GPP达到最大值和最小值时的VPD;如果VPD的值大于或等于 VPD_{max} ,则 W_s 等于0;如果VPD的值小于或等于 VPD_{min} ,则 W_s 等于1,其中 t_{air} 是 $^\circ C$ 单位的空气温度; VP_{sat} 表示饱和蒸气压(kPa), $spfh$ 表示比湿度($kgkg^{-1}$), $pres$ 表示压力(Pa)。

[0104] (4) 计算光合作用时大气 CO_2 浓度(C_s)。光合作用时大气 CO_2 浓度是计算空间像元尺度上GPP的基本参数,是基于无暗呼吸时的 CO_2 补偿点、 CO_2 的细胞间浓度、Rubisco米氏方程系数、 O_2 分压和摩尔气体常数等计算而得。

$$[0105] \quad C_s = \frac{C_i - \Gamma^*}{C_i + 2\Gamma^*} \quad (17)$$

$$[0106] \quad \Gamma^* = 4.22 \times e^{\frac{37830(T-298.15)}{298.15RT}} \quad (18)$$

$$[0107] \quad C_i = C_a \times \chi \quad (19)$$

$$[0108] \quad \chi = \frac{\xi}{\xi + \sqrt{VPD}} \quad (20)$$

$$[0109] \quad \xi = \sqrt{\frac{356.51K}{1.6\eta^*}} \quad (21)$$

$$[0110] \quad K = K_c \times \left(1 + \frac{P_o}{K_o}\right) \quad (22) \quad K_c = 39.97 \times e^{\frac{79.43 \times (T-298.15)}{298.15RT}} \quad (23)$$

$$[0111] \quad K_o = 27480 \times e^{\frac{36.38 \times (T-298.15)}{298.15RT}} \quad (24)$$

[0112] 式中： C_s 为光合作用时大气中 CO_2 浓度(ppm)； Γ^* 是无暗呼吸时 CO_2 补偿点； C_i 是 CO_2 的细胞间浓度(ppm)； C_a 为大气 CO_2 浓度(使用NOAA全球月平均 CO_2 浓度,单位为ppm)； χ 为叶内 CO_2 与环境 CO_2 的比值； K 为Rubisco米氏方程系数； η^* 是相对于25℃时的水的粘度(0.8903)； K_c 和 K_o 分别是Rubisco对 CO_2 和 O_2 的米氏方程系数； P_o 是 O_2 分压(21kPa)； R 为摩尔气体常数(8.314Jmol⁻¹K⁻¹)。

[0113] 步骤2、计算空间像元尺度上NPP。基于GPP,从其上扣除植被自养呼吸,进而计算空间像元尺度上NPP。

$$[0114] \quad NPP = GPP - R_a \quad (25)$$

$$[0115] \quad R_a = 0.68GPP + 81.90 \quad (26)$$

[0116] 式中：GPP为总初级生产力(g C m⁻²yr⁻¹)；NPP为净初级生产力(g C m⁻²yr⁻¹)； R_a 为自养呼吸(g C m⁻²yr⁻¹)。

[0117] 步骤3、计算植被最大生物量。基于年平均温度和年平均降水量计算最大植被生物量。

$$[0118] \quad B_{\max}(MAT, MAP) = 3442.194 \times \frac{0.05 + \exp(0.000158MAP)}{1 + \exp(-0.037 \times (MAT - 95.606))} + 33.128 \quad (27)$$

[0119] 式中： B_{\max} 为估算的空间各像元上各年份最大植被生物量(Mg ha⁻¹)；MAT是年平均温度(℃)，MAP是年平均降水量(mm)。

[0120] 步骤4：计算空间像元尺度上岩石化学风化溶蚀速率。运用碳酸盐岩热力学溶蚀模型计算空间像元尺度上岩石化学风化溶蚀速率,该模型是基于入渗-平衡模型拓展到区域尺度反演的遥感水化学模型,充分考虑了该碳酸盐岩化学风化过程中每一步反应所涉及到的具体的气候水文特征,水动力参数(实际温度、水量及含水层 CO_2 分压)特征。通过分析 $CaCO_3$ 溶解平衡状态下 Ca^{2+} 或 HCO_3^- 的理论活度来估算碳酸盐岩的风化溶蚀量,由于碳酸盐岩包括石灰岩和白云岩,无论是哪种岩石,其化学风化过程是一致的。由于仅需要得到溶蚀速率相对比例大小以表征P释放量差异,因此,可以碳酸盐岩化学风化过程中从岩石内部释放的 HCO_3^- 浓度来表征其溶蚀速率大小。

$$[0121] \quad CWR_{HCO_3^-} = 10^6 (P - E) (K_s K_1 K_o / 4 K_2 \gamma_{Ca^{2+}} \gamma_{(HCO_3^-)^2})^{1/3} (pCO_2)^{1/3} \quad (28)$$

[0122] 式中： $CWR_{HCO_3^-}$ 为各像元中碳酸盐岩化学风化岩石内部释放的 HCO_3^- 速率(mol/L)， P 、 E 分别为降雨(mm yr⁻¹)及实际蒸散发量(mm yr⁻¹)。 K_s 为碳酸钙溶度积常数； K_1 为 CO_2 水解为 HCO_3^- 的平衡常数； K_o 为 CO_2 溶于水的平衡常数； K_2 为 CO_3^{2-} 形成的平衡常数； $\gamma_{Ca^{2+}}$ 及 $\gamma_{HCO_3^-}$ 分别为含水层中 Ca^{2+} 及 HCO_3^- 的离子活度系数； pCO_2 为土壤含水层中 CO_2 的分压(atm)。

[0123] 步骤5：计算各像元上岩石化学风化释放的P量。基于不同类别岩石面积及各类岩

石化学风化过程中单位面积P释放量计算研究区总的P释放量,然后基于各像元面积在研究区内总面积占比及各像元岩石化学风化速率对研究区总化学风化速率的比例计算各像元上岩石化学风化释放的P量。

$$[0124] \quad P_r = P_i \times S \times \frac{CWR_{HCO_3^-,i}}{CWR_{HCO_3^-,tot}} \times S_i \quad (29)$$

[0125] 式中: P_r 为各像元上岩石化学风化释放的P($\text{kg km}^{-2}\text{yr}^{-1}$); P_i 为各类岩石化学风化过程中单位面积P释放量($\text{kg km}^{-2}\text{yr}^{-1}$) (详见表3); $CWR_{HCO_3^-}$ 为各像元中碳酸盐岩化学风化岩石内部释放的 HCO_3^- 速率(mol/L); $CWR_{HCO_3^-,tot}$ 为研究区碳酸盐岩化学风化岩石内部释放的 HCO_3^- 速率(mol/L); S_i 为像元面积(m^2); S 为研究区面积(m^2)。

[0126] 步骤6:计算空间像元尺度上生态系统所需P量。根据植被生物量中C储量及各部位含C量与C/P配额比计算当前植被生物量所需的P。考虑到不同植被类型的差异,将对各植被类型进行测算。

[0127] 所需的P为

$$[0128] \quad P_d = \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n \frac{NPP_i}{PR_i} \times (C_{L,i} / (C/P)_{L,i} + C_{S,i} / (C/P)_{S,i} + C_{C,i} / (C/P)_{C,i} + C_{F,i} / (C/P)_{F,i}) \quad (30)$$

[0129] 式中: P_d 为生态系统中各像元上所需P的量($\text{kg km}^{-2}\text{yr}^{-1}$), NPP_i 为空间各像元上净初级生产力; n 为生态系统中植被类型数量(DBF:落叶阔叶林;DNF:落叶针叶林;EBF:常绿阔叶林;ENF:常绿针叶林;GRS:草原;MXF:混合森林;SHB:封闭灌木林;SVN:稀树草原;WSV:木本稀树草原), i 为第 i 种植被类型; PR_i 为第 i 种植被类型P吸收效率; $C_{L,i}$ 为第 i 种植被类型植被生物量形成过程中叶片C的比例; $(C/P)_{L,i}$ 为第 i 种植被类型植被生物量形成过程中叶片C/P比例; $C_{S,i}$ 为第 i 种植被类型植被生物量形成过程中茎杆C的比例; $(C/P)_{S,i}$ 为第 i 种植被类型植被生物量形成过程中茎杆C/P比例; $C_{C,i}$ 为第 i 种植被类型植被生物量形成过程中粗根C的比例; $(C/P)_{C,i}$ 为第 i 种植被类型植被生物量形成过程中粗根C/P比例; $C_{F,i}$ 为第 i 种植被类型植被生物量形成过程中细根C的比例; $(C/P)_{F,i}$ 为第 i 种植被类型植被生物量形成过程中细根C/P比例。具体参数详见表2。

[0130] 步骤7:计算P限制状态下的植被最大生物量。在考虑喀斯特山区地形地貌、阳叶、阴叶不同光能利用效率差异,基于多源参数修正的两叶光能利用率模型,在考虑岩溶化学风化过程中P释放特征对植被碳汇评估方法进行二次修正,最后建立基于阴叶和阳叶光能利用差异及P限制状态下最大植被生物量估算模型。具体为基于GPP扣除植被的自养呼吸进而得到NPP。然后,基于各像元上岩石化学风化释放的P与生态系统中所需P的量的比例和含碳量因子计算P限制状态下的最大植被生物量。

$$[0131] \quad rB_{\max} = NPP/c \times P_r/P_d \quad (31)$$

[0132] 式中: B_{\max} 为估算的空间各像元上各年份最大植被生物量(Mg ha^{-1}); rB_{\max} 为基于岩石化学风化释放P含量估算的最大植被生物量(Mg ha^{-1}); NPP 为净初级生态系统生产力($\text{g C m}^{-2}\text{yr}^{-1}$); c 为含碳量因子,一般为0.5。

[0133] 步骤8:计算各像元尺度上修正后的植被生物量。修正原理是基于P限制状态下的植被生物量结果对步骤3中模型计算的最大植被生物量结果进行校正,对于没有受到P限制

的地区的植被生物量将继续采用步骤3中模型计算的结果,而受到P限制的地区则用P限制状态下的植被生物量代替。

$$[0134] \quad fB_{\max} = \min(rB_{\max}, B_{\max}) \quad (32)$$

[0135] 式中: B_{\max} 为估算的空间各像元上各年份最大植被生物量(Mg ha^{-1}); rB_{\max} 是基于岩石化学风化释放P含量估算的最大植被生物量(Mg ha^{-1}); fB_{\max} 是P限制状态修正的最大植被生物量(Mg ha^{-1})。

[0136] 步骤9:模型验证。基于实测数据对修正后的植被最大生物量模型结果进行验证。

$$[0137] \quad d = 1 - \frac{\sum_{n=1}^m (E_n - M_n)^2}{\sum_{n=1}^m (|E_n - \bar{M}| + |M_n - \bar{M}|)^2} \quad (33)$$

[0138] 式中:d为模型满意度;m为所有测量值的个数; E_n 和 M_n 分别为第n个估计值和测量值的植被生物量值; \bar{M} 表示所有测量的植被生物量值的平均值。

[0139] 表1.修订后的TL-LUE模型中使用的参数

植被类型	DBF	EBF	ENF	MXF	CRO	GRS	OSH	SVN	WET	WSV
$\varepsilon_{\text{msh}}(\text{gC MJ}^{-1})$	3.75 ± 0.5 2	3.26± 0.93	3.40± 1.19	3.00 ± 0.6 6	4.80 ± 1.9 4	4.57 ± 1.6 7	3.10 ± 0.4 2	4.65 ± 0.6 4	2.53 ± 1.0 2	2.70
$\varepsilon_{\text{msu}}(\text{gC MJ}^{-1})$	0.92 ± 0.2 9	1.44± 0.64	0.89± 0.49	0.80 ± 0.4 1	1.43 ± 0.7 5	1.16 ± 0.4 5	0.65 ± 0.0 7	3.45 ± 0.6 4	1.23 ± 0.9 2	2.60
[0140] $VPD_{\max}(\text{kPa})$	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1
$VPD_{\min}(\text{kPa})$	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
$T_{\text{opt}}(^{\circ}\text{C})$	23.1	25.8	19.7	24.5	23.5	20.9	22.3	25.8	24.2	26.2
Albedo(α)	0.18	0.18	0.15	0.17	0.23	0.23	0.16	0.18	0.23	0.23
Clumpin g index (Ω)	0.8	0.8	0.6	0.7	0.9	0.9	0.8	0.8	0.9	0.8

[0141] DBF:落叶阔叶林;EBF:常绿阔叶林;ENF:常绿针叶林;MXF:混交林;CRO:农田;GRS:草原;OSH:开阔灌木;SVN:稀树草原;WET:湿地;WSV:木质稀树草原。

[0142] 表2按植被类型划分的碳和营养循环参数

		ENF	EBF	DNF	DB F	MXF	SHB	WS V	SV N	GR S		
[0143]	分配 (比例)	叶片 C	0.43	0.56	0.44	0.49	0.39	0.38	0.43	0.39	0.56	
		茎杆 C	0.34	0.22	0.33	0.33	0.45	0.14	0.14	0.19	0	
		粗根 C	0.08	0.05	0.07	0.07	0.1	0.03	0.03	0.04	0	
		细根 C	0.16	0.17	0.16	0.11	0.06	0.45	0.39	0.38	0.44	
		叶片 C:P	408	400	405	333	278	293	354	492	833	
		茎杆 C:P	3750	2250	3750	262 5	2625	2250	225 0	225 0	225 0	
		粗根 C:P	3750	2250	3750	262 5	2625	2250	225 0	225 0	225 0	
		细根 C:P	1170	1020	615	615	615	615	615	615	615	
		吸收效 率(%)	吸收	52.2	57.6	47.2	46	54.1	54.4	66.6	45.9	56.6

[0144] DBF:落叶阔叶林;DNF:落叶针叶林;EBF:常绿阔叶林;ENF:常绿针叶林;GRS:草原;MXF:混合森林;SHB:封闭灌木林;SVN:稀树草原;WSV:木本稀树草原

[0145] 表3各类岩石化学风化过程中单位面积P释放量 ($\text{kg km}^{-2}\text{yr}^{-1}$)

	P 释放通量 ($\text{kg P km}^{-2}\text{yr}^{-1}$)		P 释放通量 ($\text{kg P km}^{-2}\text{yr}^{-1}$)	
	岩性		岩性	
[0146]	松散沉积物	6.28	酸性火山岩	3.92
	硅碎屑沉积岩	4.48	基性深成岩	37.17
	混合沉积岩	6.56	中性深成岩	10.92
	碳酸盐沉积岩	14.46	酸性深成岩	6.63
	火山碎屑岩	84.71	变质岩	4.41
	基性火山岩	29.77	蒸发岩	1.49
	中性火山岩	37.54		